

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí

Telekomunikační příhradový stožár

Telecommunication derrick antenna mast

Student:

Bc. David Míša

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Roman Fojtík

**obsah**

|   |    |
|---|----|
| 1. Úvod.....  | 1  |
| 2. Stožáry.....   | 1  |
| 2.1 Vetknuté stožáry .....  | 2  |
| 2.2 Kotvené stožáry .....   | 3  |
| 2.3 Rozdělení stožárů podle nižšího členění .....                           | 5  |
| 2.3.1 Tuhost ztužení.....   | 5  |
| 3. Komíny.....  | 6  |
| 4. Návrh konstrukce stožáru.....  | 6  |
| 4.1 Možné varianty konstrukce stožáru.....                                  | 7  |
| 5. Zatížení.....  | 10 |
| 5.1 Stálé zatížení.....   | 10 |
| 5.2 Užité zatížení .....  | 10 |
| 5.3 Zatížení sněhem.....  | 11 |
| 5.4 Zatížení větrem.....  | 11 |
| 5.5 Zatížení námrazou .....   | 12 |
| 6. Mezní stavy .....  | 12 |
| 6.1 Mezní stav únosnosti .....  | 13 |
| 6.2 Mezní stav použitelnosti.....   | 13 |
| 6.3 Mezní stav únavy.....   | 13 |
| 7. Výpočet zatížení větrem.....   | 14 |
| 7.1 Normativní postup .....   | 14 |
| 7.1.1 Vlastní frekvence .....   | 14 |
| 7.1.2 Návětrný úhel.....  | 14 |
| 7.1.3 Společná část výpočtu zatížení větrem budov i stožárů .....           | 15 |
| 7.1.4 Výpočet středního zatížení panelu stožáru větrem .....                | 16 |
| 7.1.5 Výpočet ekvivalentního nárazového zatížení panelu stožáru větrem..... | 18 |
| 7.1.5.1 Součinitel konstrukce $c_s c_d$ .....                               | 18 |
| 7.1.5.2 Ekvivalentní nárazové zatížení větrem .....                         | 20 |
| 7.1.6 Výpočet zatížení odtrháváním vírů.....                                | 20 |
| 7.2 Vstupní parametry antén a jiného vybavení stožáru.....                  | 21 |

|  |    |
|--|----|
| 7.3 Porovnání zatížení větrem na jednotlivých variantách konstrukce stožáru..... | 22 |
| 7.3.1 Navrhnuté antény na stožáru .....  | 23 |
| 7.3.2 Volba 1 varianty stožáru pro návrh konstrukce stožáru .....                | 23 |
| 7.3.3 Výpočet zatížení větrem na 1 vybraný panel stožáru .....                   | 27 |
| 7.4 Únavové zatížení .....   | 32 |
| 7.4.1 Výpočet zatížení pro rozkmit napětí při kmitání ve směru větru .....       | 33 |
| 7.4.2 Výpočet zatížení pro rozkmit napětí při odtrhávání virů.....               | 34 |
| 8. Posouzení konstrukce .....  | 36 |
| 8.1 Mezní stav únosnost .....  | 37 |
| 8.1.1 Mezní stav únosnosti prutů konstrukce .....                                | 37 |
| 8.1.1.1 Posouzení vybraného prutu v mezním stavu únosnosti .....                 | 37 |
| 8.1.1.2 Stručný přehled posouzení prutů v mezním stavu únosnosti....             | 38 |
| 8.1.2 Mezní stav únosnosti styčníků konstrukce .....                             | 39 |
| 8.1.2.1 K styčník .....  | 40 |
| 8.1.2.2 Upravený K styčník pro spoj montážních dílců.....                        | 44 |
| 8.1.2.3 T styčník .....  | 49 |
| 8.1.2.4 Spoj montážních dílců na nárožnících .....                               | 51 |
| 8.2 Mezní stav použitelnosti.....  | 54 |
| 8.3 Mezní stav únavy.....  | 55 |
| 8.3.1 Kategorie únavových detailů .....  | 56 |
| 8.3.2 Posouzení únavových detailů .....  | 58 |
| 9. Závěr.....  | 60 |

**seznam obrázků**

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | vetknutý stožár u Jaroměřic nad Rokytnou.....  | 2  |
| 2.2 | kotvený příhradový stožár u JE Dukovany .....  | 4  |
| 2.3 | kotevní blok kotveného stožáru, závaží pro úpravu dynamických vlastností<br>kotevních lan..... | 4  |
| 4.1 | srovnávané varianty ztužení příhradové konstrukce stožáru .....                                | 8  |
| 7.1 | deformace konstrukce od zatížení větrem před ztužením tvaru půdorysu.....                      | 24 |
| 7.2 | deformace konstrukce od zatížení větrem po přidání ztužidel.....                               | 25 |
| 7.3 | změna 1. vlastních tvarů kmitání před a po přidání horizontálních ztužidel .....               | 26 |
| 8.1 | detail K styčnicku v měřítku 1:5.....  | 40 |
| 8.2 | detail upraveného K styčnicku v měřítku 1:5 .....  | 44 |
| 8.3 | detail T styčnicku v měřítku 1:5 .....   | 49 |
| 8.4 | detail šroubového spoje mezi montážními dílci v měřítku 1:5 .....                              | 52 |
| 8.5 | kategorie únavových detailů K styčnicku.....   | 57 |
| 8.6 | kategorie únavových detailů T styčnicku .....  | 57 |
| 8.7 | kategorie únavových detailů upraveného K styčnicku .....                                       | 58 |

**seznam tabulek**

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 4.1 | porovnání horizontálních výchylek ve vrcholu stožáru .....                                 | 9  |
| 7.1 | přehled zatížení stožáru větrem na jednotlivých panelech .....                             | 31 |
| 7.2 | přehled zatížení stožáru větrem do jednotlivých uzlů .....                                 | 32 |
| 7.3 | výpočet poryvových součinitelů .....   | 34 |
| 7.4 | zatížení odtrháváním vírů .....  | 36 |
| 8.1 | posouzení prutů konstrukce .....   | 38 |
| 8.2 | přehled pootočení normál k plochám antén kolem os GSS .....                                | 55 |
| 8.3 | rozkmity napětí a výpočty počtu cyklů v únavových detailech<br>spojů montážních dílů ..... | 59 |
| 8.4 | ověření podmínek maximální velikosti rozkmitů napětí .....                                 | 60 |

**Seznam použitého značení veličin**velká písmena latinské abecedy

|                         |   |
|-------------------------|---|
| $A, A_i$ .....          | průřezová plocha; plocha panelu   |
| $A_a$ .....             | návětrná plocha příslušenství   |
| $A_c$ .....             | návětrná plocha panelu; návětrná plocha kruhových průřezů při podkritickém obtékání                               |
| $A_c$ .....             | návětrná plocha příslušenství   |
| $A_{c,sup}$ .....       | návětrná plocha kruhových průřezů při nadkritickém obtékání   |
| $A_f$ .....             | návětrná plocha plochých průřezů  |
| $A_{net}$ .....         | oslabená průřezová plocha   |
| $C_1, C_2$ .....        | bezrozměrný součinitel závislý na tvaru půdorysu konstrukce   |
| $C_\theta$ .....        | bezrozměrný součinitel směru větru  |
| $F_{m,w}$ .....         | střední zatížení větrem   |
| $F_{t,w}$ .....         | nárazové zatížení větrem  |
| $F_w$ .....             | zatížení odtrháváním vírů   |
| $G$ .....               | poryvový součinitel   |
| $I_v$ .....             | intenzita turbulence  |
| $I_y$ .....             | moment setrvačnosti průřezu   |
| $K$ .....               | součinitel poměrné štíhlosti  |
| $K_1, K_2, K_\theta$ .. | bezrozměrné součinitele   |
| $L$ .....               | měřítka délky turbulence, délka prutu   |
| $M_{pl,Rd}$ .....       | plastický moment v čelní desce  |
| $N_{b,Rd}$ .....        | únosnost prutu ve vzpěrném tlaku  |
| $N_{ed}$ .....          | návrhová hodnota normálové síly, návrhová životnost vyjádřená počtem cyklů  |
| $N_{Rd}$ .....          | únosnost prutu v tahu, prostém tlaku; počet cyklů, které je schopen únavový detail vydržet bez únavového porušení |
| $Re$ .....              | Reynoldsovo číslo   |
| $R_h, R_b$ .....        | aerodynamické admitance   |
| $R, B$ .....            | složky dynamické odezvy konstrukce  |
| $S_L$ .....             | jednostranné spektrum rozptylu  |
| $Sc$ .....              | Scrutonovo číslo  |

$St$  ..... Strouhalovo číslo  
 $T$  ..... integrační doba pro stanovení střední rychlosti větru  
 $A_{net}$  .....  
 $A_{net}$  .....  
 $A_{net}$  .....

### malá písmena latinské abecedy

$a_{we}$  ..... účinný rozměr svaru  
 $b$  ..... šířka konstrukce  
 $c_0$  ..... součinitel orografie  
 $c_{dir}$  ..... součinitel směru větru  
 $c_e$  ..... součinitel expozice  
 $c_f$  ..... tvarový součinitel panelu konstrukce  
 $c_{f,a}$  ..... tvarový součinitel příslušenství  
 $c_{f,s}$  ..... celkový tvarový součinitel konstrukce  
 $c_{f,0,f}$ ,  $c_{f,0,c}$ ,  $c_{f,0,c,sup}$  ..... tvarové součinitele, závislé na tvaru průřezů  
 $c_{lat}$  ..... součinitel příčné síly  
 $c_r$  ..... součinitel drsnosti  
 $c_s c_d$  ..... součinitel konstrukce  
 $c_{season}$  ..... součinitel ročního období  
 $d$  ..... vnější průměr trubky  
 $e$  ..... vzdálenost šroubu od trubky, výztuhy nebo okraje plechu  
 $f_L$  ..... bezrozměrná frekvence stanovená pro 1. vlastní frekvenci konstrukce  
 $f_u$  ..... mez pevnosti oceli  
 $f_y$  ..... mez kluzu oceli  
 $h$  ..... výška konstrukce  
 $i_y$  ..... poloměr setrvačnosti průřezu  
 $k_l$  ..... součinitel turbulence  
 $k_p$  ..... součinitel maximální hodnoty  
 $l_{we}$  ..... délka svaru  
 $m_s$  ..... hmotnost, která se podílí na kmitání odtrháváním vírů  
 $n_{l,x}$  ..... 1. vlastní frekvence konstrukce  
 $n_{we}$  ..... počet svarů  
 $p$  ..... vzdálenost mezi šrouby

|                     |  |
|---------------------|--|
| $q_b$ .....         | základní tlak větru  |
| $q_p$ .....         | základní dynamický tlak                                      |
| $t$ .....           | tloušťka stěny trubky  |
| $u_x, u_y, u$ ..... | horizontální výchylky stožáru                                |
| $v$ .....           | frekvence přechodů s kladnou směrnici                        |
| $v_b$ .....         | základní rychlost větru                                      |
| $v_{b,0}$ .....     | základní rychlost větru určená z mapy větrných oblastí       |
| $v_{crit}$ .....    | kritická rychlost, při které může docházet k odtrhávání vírů |
| $v_m$ .....         | střední rychlost větru                                       |
| $y_{F,max}$ .....   | maximální výchylka v závislosti na čase                      |
| $z, z_i$ .....      | výška těžiště panelu konstrukce nad terénem                  |
| $z_0$ .....         | parametr drsnosti terénu                                     |
| $z_{min}$ .....     | minimální výška konstrukce                                   |

#### velká písmena řecké abecedy

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| $\Delta\sigma, \Delta\tau$ .....     | rozkmit napětí v únavovém detailu                                  |
| $\Delta\sigma_c, \Delta\tau_c$ ..... | únavová kategorie detailu  |
| $\Delta\sigma_d$ .....               | mez únavy mez únavy  |
| $\Delta\sigma_l, \Delta\tau_l$ ..... | prahový rozkmit napětí   |
| $\phi$ .....                         | tvar kmitu konstrukce normovaný jednotku v bodě maximální výchylky |

#### malá písmena řecké abecedy

|                      |   |
|----------------------|---|
| $\alpha$ .....       | součinitel tvaru styčnicku                                    |
| $\beta_{cr}$ .....   | součinitel kritické délky                                     |
| $\beta_w$ .....      | opravný součinitel svaru                                      |
| $\gamma_g$ .....     | součinitel spolehlivosti pro stálá zatížení                   |
| $\gamma_{m,0}$ ..... | součinitel spolehlivosti materiálu oceli                      |
| $\gamma_{m,2}$ ..... | součinitel spolehlivost únosnosti spojů                       |
| $\gamma_{m,f}$ ..... | součinitel zatížení pro únavové zatížení                      |
| $\gamma_q$ .....     | součinitel spolehlivosti pro proměnná zatížení                |
| $\delta$ .....       | logaritmický dekrement útlumu                                 |
| $\delta_a$ .....     | logaritmický dekrement útlumu příslušenství                   |
| $\delta_d$ .....     | logaritmický dekrement útlumu přídatnými tlumícími zařízeními |
| $\delta_s$ .....     | logaritmický dekrement konstrukčního útlumu                   |



- $\eta_b, \eta_h$  ..... bezrozměrní součinitelé závislé na dynamických vlastnostech konstrukce
- $\theta$  ..... návětrný úhel
- $\lambda$  ..... štíhlost prutu, součinitel korelační délky; součinitel převodu rozkmitu napětí na rozkmit napětí při  $2 \times 10^6$  cyklů
- $\rho$  ..... hustota vzduchu
- $\sigma_{\perp}$  ..... normálové napětí kolmé k rovině svaru
- $\tau_{\perp}$  ..... smykové napětí působící v rovině svaru kolmo k délce svaru
- $\tau_{\parallel}$  ..... smykové napětí působící v rovině svaru rovnoběžně s délkou svaru
- $\varphi$  ..... součinitel plnosti
- $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$  ..... pootočení normál k plochám antén
- $\chi$  ..... součinitel vzpěru, poměr šířek trubek ve styčnku

## Příhradový telekomunikační stožár

Cílem diplomové práce je popsat telekomunikační stožáry, klasifikovat je do jednotlivých druhů, srovnat je a následný návrh jedné varianty konstrukce. Součástí práce také bylo provedení rešerše v terénu, během které jsem navštívil, nebo shlédl, několik telekomunikačních stožárů, z nichž některé sloužily jako rozhledny.

V práci provádíme návrh nosné konstrukce vetknutého příhradového stožáru nesoucí několik telekomunikačních antén. Navržená konstrukce byla posouzena na mezní stav únosnosti, použitelnosti a únavy. Návrh a posouzení konstrukce stožáru je doložen výpočtem zatížení konstrukce, dimenzováním prutů a styčníků, posouzením na mezní stavy a výkresovou dokumentací.

## Telecommunication derrick antenna mast

The aim of the thesis is to describe telecommunications masts, classify them into different species and their comparison. Then it is designed one of variants. Part of the work was also performing research outdoor, during which was visited or looked several telecommunications masts, some of them served as an observation towers.

In this work we provide design of the supporting structure of cantilever truss mast. The mast carries several telecommunications antennas. Designed structure was assessed at the ultimate limit state, serviceability and fatigue. Design and assessment of the mast is documented the loading calculation, dimensioning of beams and joints, assessing the limit states and drawings.

**Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....

## **1. Úvod**

Telekomunikační stožáry jsou stavby, které jsou v dnešní době součástí krajiny a mohou tvořit dominanty krajiny. Pro přenos informací a dat vzduchem se používají telekomunikační antény. Vlivem svého tvaru a velikosti má každá jiný odpor vzduchu při působení větru. Pokud jsou na stožár přidávány antény, nebo jsou vyměňovány za jiné, popř. jsou odebírány, stožár bude mít jiný odpor vzduchu při působení větru, a proto je nutné znovu provést výpočet zatížení větrem a posoudit nosnou konstrukci.

V diplomové práci popisujeme telekomunikační stožáry, klasifikujeme je do jednotlivých druhů a následně provádíme návrh konstrukce vetknutého příhradového stožáru nesoucí několik telekomunikačních antén. Před podrobným návrhem a jeho posouzení jsme porovnali několik variant tvarů nosné konstrukce.

Navrženou konstrukci posuzujeme na mezní stav únosnosti, ve kterém posuzujeme pruty konstrukce, svarové a šroubové spoje. Mezní stav použitelnosti najde uplatnění při posouzení maximálních posunů a úhlových vychýlení antén. V místech koncentrace napětí ověřujeme vznik únavového porušení. Koncentrace napětí se zpravidla objevuje v částech styčníků konstrukce. Návrh konstrukce stožáru je doložen výpočtem zatížení konstrukce, dimenzováním prutů a styčníků, posouzením na mezní stavy a výkresovou dokumentací.

## **2. Stožáry**

Stožáry jsou vysoké stavby vzhledem ke svému půdorysu. Teoreticky by se dala přibližně uvažovat nějaká hranice poměru výšky k půdorysnému rozměru, při jejímž překročení podle normy [6] je konstrukce vysoká a štíhlá, ale nelze se jím vždy řídit. V literatuře se uvádí poměr  $h/b = 1/10$ .

Obecně lze říct, že vysoké stavby sahající vysoko nad okolní terén jsou namáhány mnohem více větrem, který převažuje nad ostatními zatíženími na rozdíl od budov. To je typické právě pro anténní stožáry, stožáry vedení vysokého napětí a rozhledny. Tyto stavby mohou někdy tvořit dominantu místní krajiny.

Konstrukce se skládají z prutů, které mají jednoduchý tvar průřezu a které umožňují jednoduché provedení styčníků a snadněji je obtéká vzduch. Jsou to obvykle průřezy z pásové oceli, úhelníků nebo trubek.

## **2.1 Vetknuté stožáry**

U stožárů rozlišujeme 2 druhy podle konstrukce stožáru. Prvním druhem jsou stožáry vetknuté. Konstrukce je složena z prutů, které jsou ukotveny jen do základů pod vlastním stožárem. Ohybový moment vyvolaný horizontálním zatížením, například větrem, se přenáší dvojicí sil s ramenem jen několika málo metrů. Proto vetknuté stožáry nebývají příliš vysoké.

*obrázek 2.1 – vetknutý stožár u Jaroměřic nad Rokytnou*



Na mnoha místech však bylo možné vidět stožáry se stejným tvarem konstrukce jakou má stožár nad Jaroměřicemi nad Rokytnou (viz obrázek 2.1). Na všech takových shlédnutých stožárech byly viděny pouze antény mobilních operátorů.

U rozhledny na Travičné s půdorysem cca 10 x 10 metrů se výška pohybuje kolem 70 metrů. Výšku stožáru byla odhadnuta podle výšky ochozu 57,5 metrů. Rozhledna byla vytvořena přidáním ochozu na telekomunikační stožár. Aby stožáry mohly sloužit zároveň jako rozhledny, nesmí být tolik štíhlé.

## **2.2 Kotvené stožáry**

Pro stavbu vyšších stožárů je nutno použít právě tento druh konstrukce - kotvené stožáry. I při relativně malém půdorysu se dá díky kotvení lany v několika úrovních stožáru dosáhnout výšky nad 100 metrů. Síla v lanech se přenáší do kotevních bloků, přičemž se musí při návrhu uvažovat s důsledky přetržení některého z kotevních lan. Protože lana nemají dostatečnou tuhost kolmo k podélné ose, díky jejich pružnosti je u těchto stožárů problém s dynamikou.

Tento druh stožáru můžeme vidět poblíž jaderné elektrárny (viz obrázek 2.2) Dukovany a pravděpodobně jde o stožár sloužící k předpovídání počasí. Až k patě stožáru nebylo možné dojít, protože oplocení bylo ve velké vzdálenosti od paty stožáru. Odhadem se půdorysný rozměr může pohybovat kolem 3-5 metrů a výška kolem 100 metrů.

Stožár je kotven blízko poloviny výšky a vrcholu stožáru v celkem 2 úrovních. Kotevní bloky jsou tvořeny betonovými monolitickými bloky a poblíž konce kotevního lana u kotevních bloků můžete spatřit dodatečně namontované závaží, které slouží k úpravě dynamických vlastností lan. Pro upřesnění velikosti (viz sloupek plotu na obrázku 2.3) před kotevním blokem je vysoký cca 180 cm.

*obrázek 2.2 - kotvený příhradový stožár u JE Dukovany**obrázek 2.3 – kotevní blok kotveného stožáru (vlevo), závaží pro úpravu dynamických vlastností kotevních lan (vpravo)*



## **2.3 Rozdělení stožárů podle nižšího členění**

Oba druhy stožárů mají 2 stejné poddruhy podle tvaru konstrukce. Stožáry se staví buď z plnostěnných profilů, a to velkých a dutých trub – **plnostěnné stožáry**, nebo jsou tvořeny příhradovou konstrukcí. Plnostěnné stožáry jsou pak mnohem více zatíženy větrem, protože mají velkou návětrnou plochu. Používají se také zejména z důvodu časté návštěvnosti lidmi, například vysílač v Praze na Žižkově. Důvodem může být přítomnost technického vybavení pro přepravu osob nahoru a dolů, kde je potřeba ochránit některé součásti tohoto vybavení před klimatickými jevy. Důvodem pro volbu tohoto poddruhu může být i architektonický vzhled stožáru v okolní zástavbě.

Druhým poddruhem jsou **příhradové stožáry**, u kterých se konstrukce skládá z mnoha kratších prutů z menších profilů, a to z nárožníků (svislé, nebo mírně šikmé pruty vedoucí po celé délce montážního dílu nebo celého stožáru) a výplňových prutů (diagonály a vodorovné pruty – horizontály). Takové stožáry pak mají výrazně menší návětrnou plochu a tím i menší hmotnost ocelové konstrukce. Příhradové stožáry se používají zejména pro anténní stožáry na vrcholech kopců s anténami operátorů sítí mobilních telefonů. Na těchto se lidé vyskytují pouze při údržbě či výměně antén.

### **2.3.1 Tuhost ztužení**

U stěnových konstrukcí tvoří stěny významný ztužující prvek. Pokud se nedá použít jako ztužidlo stěna ať už z důvodu malé stěnové tuhosti, nebo požadavků investora, jsou konstrukce ztužovány pruty. Sem spadají ztužidla, která dále rozdělujeme na rámová a příhradová [10].

U příhradových konstrukcí se rámová ztužidla až na výjimky nepoužívají, protože by do prutů konstrukce vnášela i namáhání ohybem. Například v hypermarketu Globus v Ostravě je zastřešení neseno příhradovými ocelovými nosníky a vazníky na betonových sloupech. U několika nosníků je v 1 poli vynechána diagonála a styčníky jsou provedeny rámově. Ve většině podobných hypermarketů se v drtivé většině vyskytují prefabrikované vysoké předpjaté železobetonové nosníky.



### **3. Komíny**

Komíny neřadíme mezi stožáry. Jsou v textu zmíněny, protože jsou si v mnohém podobné, například poměrem mezi výškou a šířkou, chováním konstrukce do vlivu klimatických podmínek.

Stejně jak navrhování stožárů, tak i komínů je popsáno detailněji v druhé polovině ČSN EN 1993, část 3 [6]. Komíny ovšem mají řadu odlišností, a proto je pro ně sepsána samostatná část normy. Ve většině případů jsou komíny plnostěnné. Hlavní rozdíl v návrhu spočívá v tom, že se při návrhu oproti plnostěnným stožárům přihlíží i k zatížení změnou teploty konstrukce. Zdroj tepla je uvažován teplem spalín zevnitř komína.

### **4. Návrh konstrukce stožáru**

Navržená konstrukce je vysoká 29 metrů a skládá se ze 4 montážních dílců, které budou na staveništi spojeny šroubovými montážními spoji. Všechny pruty příhradové konstrukce jsou navrženy z různě velkých profilů kruhových trubek. Nárožníky jsou navrženy průběžné po celé délce montážního dílce a k nim jsou přes přivařený styčnickový plech připevněny výplňové pruty příhradové konstrukce. Styčnickový plech je přivařen k boku trubky nárožníku a neprochází skrz její stěnu na druhou stranu.

První montážní dílec, který je přímo uchycen k základové patce, má proměnnou šířku. V místě styku tohoto montážního dílce a patky šířka konstrukce činí 2 metry a směrem nahoru se snižuje až na 1 metr. Poté až na vrchol stožáru šířka zůstává na 1 metru. Všechny montážní dílce, kromě nejvyššího, jsou ukončeny přírubami na nárožnicích, které jsou k nim přivařeny v horizontální poloze. Horní hrana přírub na nárožnicích je 200 mm nad osou nejvyšších horizontálních prutů montážního dílce.

Nárožníky jsou tvořeny kruhovými trubkami s vnějším průměrem v prvním montážním dílci 108,8 mm, ve druhém 101,6 mm, v třetím 88,9 mm a ve čtvrtém 76,4 mm. Tloušťka nárožníků je pro první a druhý dílec 8,8 mm, pro třetí 7,1 mm a pro čtvrtý 4,0 mm. Všechny diagonály do výšky 20 m jsou tvořeny kruhovými trubkami s vnějším průměrem 44,5 mm a tloušťkou 3,6 mm. Nad touto výškou se dimenze diagonál snižuje na trubky s vnějším

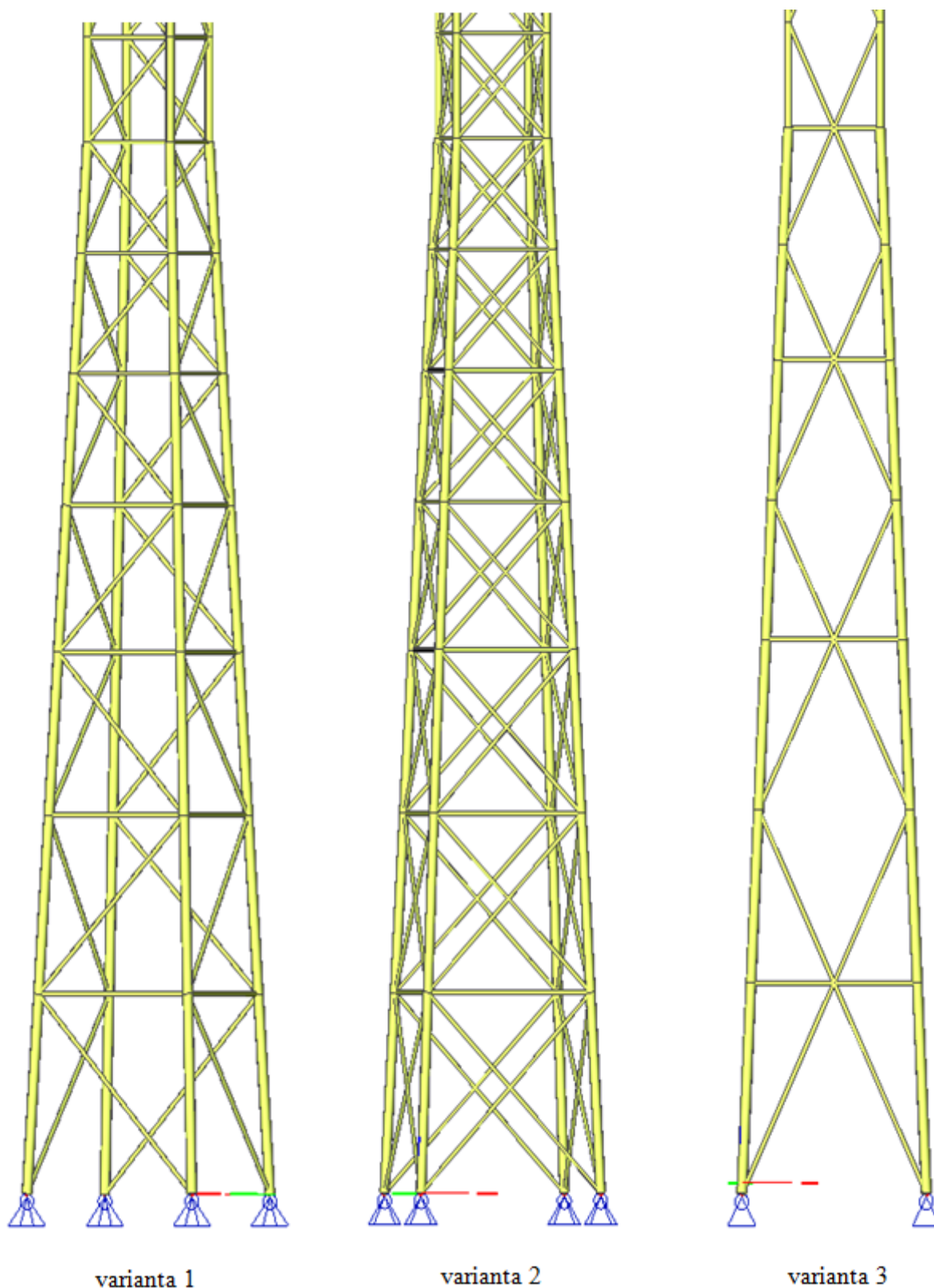
průměrem 31,8 mm a tloušťkou 3,6 mm. Horizontály ve spodních 2 úrovních jsou tvořeny stejnými trubkami jako většina diagonál a zbývající horizontály jsou tvořeny trubkami s vnějším průměrem 31,8 mm a tloušťkou 3,6 mm.

Konstrukce stožáru byla modelována jako prostorová příhradová konstrukce. Veškeré zatížení, kromě vlastní tíhy, bylo vloženo jako osamělé síly do uzlů konstrukce. Při vrcholu stožáru konstrukce je navržena obdélníková telekomunikační anténa v poloze nastojato a 2 parabolické antény.

#### **4.1 Možné varianty konstrukce stožáru**

Příhradová ztužidla mají více variant podle geometrie diagonál. V programu Scia Engineer byly modelovány 3 varianty příhradové konstrukce s různým tvarem ztužení (viz obrázek 4.1) a se stejnou hmotností celé konstrukce. Bylo modelováno více variant, aby bylo možné porovnat deformace všech při stejné velikosti zatížení. Hmotnost jednotlivých variant se liší jen o jednotky kilogramů. Některé varianty jsou pootočeny, aby z obrázku byla zřejmá geometrie konstrukce. Pro obdržení hodnot deformací pro objektivní porovnání variant byl zachován přibližně stejný poměr dimenzí prutů v částech konstrukce.

Pro prvotní srovnání bylo nutné zvolit velikost a podobu jednotné velikosti zatížení. Zatížení pro srovnání bylo zvoleno v podobě zatížení pouze nejvyššího panelu příhradové konstrukce silami o velikosti 10 kN do uzlů (velikost v každém uzlu), které leží na hranici panelu. Silami bylo postupně otáčeno v horizontální rovině v rozmezí úhlu od  $-45^\circ$  do  $45^\circ$  od normály k ploše panelu. Výpočet byl lineární, a proto lze použít princip superpozice – při dvojnásobné hodnotě sil je vypočtená horizontální výchylky rovněž dvojnásobná.

*obrázek 4.1 – srovnávané varianty ztužení příhradové konstrukce stožáru*

Se silami bylo otáčeno po  $5^\circ$ . Pro každý úhel byla do tabulky 4.1 zapsána horizontální posun uzlů ve směru osy  $x$  i ve směru osy  $y$ . Celkový horizontální posun  $u$  se vypočítá z posunů  $u_x$

a  $u_y$  pomocí Pythagorovy věty. Maximální hodnota z celkových posunů uzlů sloužila jako hlavní veličina pro srovnání 3 variant ztužení stožáru.

tabulka 4.1 – porovnání horizontálních výchylek ve vrcholu stožáru

|            | návětrný<br>úhel [°] | $u_x$<br>[mm] | $u_y$<br>[mm] | $u$<br>[mm] |
|------------|----------------------|---------------|---------------|-------------|
| varianta 1 | 0                    | 0,00          | 452,40        | 452,40      |
|            | 5                    | 71,30         | 481,00        | 486,26      |
|            | 10                   | 142,10        | 505,90        | 525,48      |
|            | 15                   | 211,80        | 527,00        | 567,97      |
|            | 20                   | 279,90        | 544,00        | 611,78      |
|            | 25                   | 345,80        | 556,90        | 655,53      |
|            | 30                   | 409,10        | 565,60        | 698,04      |
|            | 35                   | 469,30        | 570,00        | 738,34      |
|            | 40                   | 526,00        | 570,00        | 775,61      |
|            | 45                   | 578,60        | 565,60        | 809,12      |
| varianta 2 | 0                    | 0,00          | 607,90        | 607,90      |
|            | 5                    | 99,80         | 651,60        | 659,20      |
|            | 10                   | 198,80        | 690,20        | 718,26      |
|            | 15                   | 269,30        | 723,70        | 772,18      |
|            | 20                   | 391,60        | 751,60        | 847,50      |
|            | 25                   | 489,30        | 773,80        | 915,52      |
|            | 30                   | 572,50        | 790,20        | 975,79      |
|            | 35                   | 656,70        | 800,50        | 1035,40     |
|            | 40                   | 736,00        | 804,70        | 1090,52     |
|            | 45                   | 809,60        | 802,80        | 1140,15     |
| varianta 3 | 0                    | 0,00          | 591,60        | 591,60      |
|            | 5                    | 95,70         | 632,10        | 639,30      |
|            | 10                   | 190,60        | 667,70        | 694,37      |
|            | 15                   | 284,10        | 698,30        | 753,88      |
|            | 20                   | 375,40        | 723,60        | 815,18      |
|            | 25                   | 463,80        | 743,30        | 876,13      |
|            | 30                   | 548,80        | 757,40        | 935,33      |
|            | 35                   | 629,50        | 765,70        | 991,25      |
|            | 40                   | 705,50        | 768,30        | 1043,08     |
|            | 45                   | 776,10        | 764,90        | 1089,68     |

Při porovnávání všech variant jsme dospěli k překvapivému pořadí maximálních horizontálních posunů uzlů konstrukce od nejmenšího po největší. Nejlépe dopadla varianta 1. To bylo překvapivé, protože má pouze polovinu diagonál jako varianty 2 i 3. Pravděpodobně

je to způsobeno tím, že se část hmotnosti stožáru použité na druhou polovinu diagonál u variant 2 a 3 se rozdělila mezi diagonály a nárožníky varianty 1.

Bylo předpokládáno, že na druhém místě bude varianta 2, protože úhel připojení diagonál k nárožníkům se blíží více k  $45^\circ$  než je tomu u varianty 3. Nejvhodnější se ukázala varianta 1, a proto byla vybrána pro další postup, protože byla nejlehčí a měla nejmenšími horizontální posuny uzlů. Ta byla porovnána s variantou 2 při zatížení nárazovým větrem v kapitole 7.3.2

## **5. Zatížení**

Stožáry patří mezi pozemní stavby stejně jako domy, haly atp. Působí na ně stejné druhy zatížení jako na budovy, ale u některých zatížení se hodnota sil nebo spojitých zatížení počítá jiným způsobem. Důvodem je, že zatížení není závislé pouze na rozměrech konstrukce. Například v důsledku zatížení větrem může docházet ke kmitání konstrukce. Proto je při výpočtu zatížení větrem stožárů nutné uvážit i dynamické vlastnosti konstrukce.

### **5.1 Stálé zatížení**

Do stálého zatížení stožárů patří zejména vlastní hmotnost konstrukce a vybavení stožáru. Do vybavení lze zařadit telekomunikační antény, kabelová vedení, žebříky nebo schodiště a u rozhleden ochozy.

### **5.2 Užité zatížení**

Užité zatížení se aplikuje pouze na žebřících a obslužných lávkách pro montáž či údržbu antén. Pro obslužné lávky zatížení dle ČSN EN 1993-3-1 [6], odstavce 2.4.6 (1) udává hodnotu  $2 \text{ kN/m}^2$ .

Užité zatížení na prutech se uvažuje při montáži nebo údržbě konstrukce. Užité zatížení se podle ČSN EN 1993-3-1 [6] na prutech se sklonem do  $30^\circ$  od vodorovné roviny. Zatížení se aplikuje buď silou uprostřed délky prutu v charakteristické hodnotě  $1 \text{ kN}$ , nebo spojitým rovnoměrným zatížením ve svislém směru o charakteristické hodnotě  $0,75 \text{ kN/m}$ . Protože se

však montáž ani údržba neprovádí za silného větru, nemělo by se toto zatížení kombinovat se zatížením od větru. Je to podobné jako u krovových nebo plochých střech.

### **5.3 Zatížení sněhem**

Zatížení sněhem u příhradového stožáru není uvažováno, poněvadž na stožáru není žádná větší plocha, na které by se sníh delší dobu udržel. Zatížení sněhem by se aplikovalo pouze, pokud by na stožáru byl namontován zastřešený ochoz rozhledny. Právě na této střeše by se sníh mohl déle udržet.

### **5.4 Zatížení větrem**

Zatížení od působení větru se oproti budovám počítá jiným způsobem. Základ výpočtu zatížení je stejný. Je zapotřebí výška a půdorysné rozměry stožáru. U Intenzity turbulence větru a rychlosti větru společný postup s výpočtem zatížení větrem na budovy končí a jde jinou cestou.

U stožárů je důležitá dynamika konstrukce a s tím souvisí i chování stožáru při působení větru. Zatížení větrem je závislé na vlastnostech konstrukce, a to návětrné ploše, výšce nad terénem a první vlastní frekvenci konstrukce stožáru. Kromě toho závisí velikost zatížení od větru také na návětrném úhlu, který se měří od normály k panelu konstrukce ke směru větru a oblasti podle větrné mapy z ČSN EN 1991-1-4 [4].

Používá se ekvivalentní statická metoda, kdy se na počátku zvolí vlastní frekvence konstrukce  $n_{lx}$ , jejíž hodnotu norma doporučuje v intervalu 1 až 2,5 Hz. Poté se nadimenzují profily prutů. V každé následující iteraci do výpočtu zavedeme skutečnou 1. vlastní frekvenci konstrukce a s její pomocí dojdeme opět k zatížení větrem. Po aplikaci zatížení konstrukce můžeme posoudit profily prutů. Pokud se u nějakého prutu konstrukce změní profil, musíme udělat další iteraci. Tento postup se provádí, dokud nedocílíme stavu, kdy nebude potřeba měnit profil žádného z prutů konstrukce. Tímto iteračním postupem dojdeme k velikosti zatížení na panel konstrukce v podobě celkové síly v kN. Výpočetní postup je podrobněji popsán v kapitole 7.1.

celkové zatížení na panel konstrukce lze rozdělit do styčníků podle velikostí návětrných ploch jednotlivých prutů panelů. Příhradová konstrukce stožáru bude ve výsledku zatížena ve styčnících bodovými silami.

### **5.5 Zatížení námrazou**

Protože konstrukce stožárů bývají vystaveny klimatickým jevům a nejsou uzavřeny pod pláštěm budovy apod., vyskytuje se na konstrukcích v zimním období námraza. Znamená to, že fyzicky se konstrukce obalí vrstvou zmrzlé vody, která konstrukci zaprvé přitěžuje tíhou objemu vody namrzlé na povrchu konstrukce stožáru. Podle mapy námrazy České republiky spadá navrhovaná konstrukce do oblasti R3, což znamená přetížení rovnoměrné zatížení po délce prutu  $1,6 \text{ kg/m}$  ve směru gravitace. Pro tento zatěžovací stav byl použit součinitel spolehlivosti  $\gamma_g=1,35$ , stejně jako pro vlastní tíhu konstrukce i antén.

Zadruhé obalení konstrukce vrstvou namrzlé vody se zvyšuje návětrná plocha a mění se tím chování konstrukce vlivem jiného zatížení od větru změnou součinitele odporu konstrukce  $C_{sod}$ . Tento součinitel se stanovuje dle ISO 4355, který nebyl pro ČR zaveden. Protože dle ČSN ISO 12494 nelze kvalifikovaně stanovit tuto hodnotu, byla převzata hodnota podobného charakteru z ČSN EN 1991-1-3. Za předpokladu podobnosti součinitele tvaru konstrukce  $c_s c_d$  se součinitelem orografie  $C_o$  je dle ČSN ISO 12494 nárůst odporu maximálně o nevýznamné jednotky procent. Tato hodnota je pak z důvodu dostatečné únosnosti pro výsledné využití konstrukce nevýznamná!

### **6. Mezní stavy**

Pro posouzení stožárů platí stejné mezní stavy jako pro ostatní stavby a budovy. Kromě mezního stavu únosnosti, který je nezbytné uvážit u všech staveb, a použitelnosti, který se u stožáru modifikuje (viz kapitola 6.2)

Vítr působí na konstrukci stožáru dynamicky, a proto konstrukce stožárů posuzujeme i únavu. Proměnná složka zatížení větrem vzniká vlivem střídavého odtrhávání vírů na opačných stranách konstrukce, a tím se stožár může rozkmitat kolmo ke směru větru.

### **6.1 Mezní stav únosnosti**

V tomto mezním stavu jsou posouzeny jednotlivé pruty, zdali napětí překročilo nebo nepřekročilo meze kluzu oceli nebo kritické napětí. Napětí pochází od nejnepříznivější kombinace zatížení vlastní tíhou konstrukce, vlastní tíhou antén a jejich příslušenstvím a zatížení větrem. Kromě prutů je potřeba navrhnout a posoudit styčníky v konstrukci a montážní spoje mezi jednotlivými dílci, které se odděleně dopravují na staveniště. Jedná se o posouzení oslabených průřezů prutů, styčnickových plechů, čelních desek, svarů a šroubů.

### **6.2 Mezní stav použitelnosti**

Dnes je požadováno, aby maximální horizontální výchylka konstrukce stožáru nepřekročila hodnotu stanovenou v technických normách. Jedná se o to, aby se konstrukce stožáru nekývala natolik, aby lidé v okolí stožáru neměli strach, že se stožár zřítí. Můžeme to nazvat pocitem bezpečí.

Drobná modifikace mezního stavu použitelnosti spočívá v tom, že kromě velikosti horizontální výchylky stožáru pro pocit bezpečí musíme uvážit i maximální možnou výchylku pro správnou funkci telekomunikačních antén umístěných na stožáru. V tomto smyslu budeme muset určit hodnotu maximální úhlové výchylky od stavu při bezvětří, aby nebyl narušen správný přenos dat telekomunikačními anténami.

### **6.3 Mezní stav únavy**

Na únavu posuzujeme u příhradové konstrukce pouze styčníky, protože profily prutů konstrukce jsou kromě konců po celé své délce tvořeny neoslabený průřezem. Podle tvaru styčnicku jej zařadíme do kategorie detailu a podle pozice na Wöhlerově křivce, se určí počet cyklů, kterým je schopen styčník konstrukce odolat.

Rozkmit napětí ve styčnicích je způsoben kmitáním konstrukce ve směru větru a kolmo ke směru větru odtrháváním vírů na profilech prutů. Zatížení vyvolávající kmitání ve směru větru se vypočte ze střední rychlosti větru  $F_{m,w}$  a poryvového součinitele  $G$ . Při odtrhávání vírů uvažujeme nejméně příznivou variantu, kdy bude odtrhávání vírů na nárožnicích nastávat po celé výšce stožáru.



## **7 Výpočet zatížení větrem**

Po volbě jedné varianty ztužení konstrukce jsme přikročili k výpočtu zatížení větrem a dimenzování konstrukce na nárazový vítr.

### **7.1 Postup výpočtu zatížení větrem podle eurokódů**

Výpočet zatížení větrem se provádí podle ČSN EN 1993-3-1 [6] a ČSN EN 1991-1-4 [4]. Postup výpočtu je rozepsán v podkapitolách.

#### **7.1.1 Vlastní frekvence**

1. vlastní frekvence se u složitých konstrukcí, jako jsou příhradové a rámové konstrukce, nebo konstrukce s rovnoměrně rozloženou hmotou nedá jednoduše ručně spočítat. Dnes jsou dostupné programy na statické výpočty konstrukcí využívající výpočtů se složitými maticemi, z nichž ty více rozšířené dovedou počítat i dynamické výpočty. Aby bylo možno provést dynamický výpočet, musíme být zadána i hmotnosti prutů a bodových hmot, které představují antény.

Pro návrh telekomunikačního stožáru, což je cílem této diplomové práce, budou zapotřebí vlastní tvary kmitání a hodnoty vlastních frekvencí. Nejdůležitější je 1. vlastní frekvence a 1. vlastní tvar kmitání konstrukce. U stožárů se pohybují vlastní frekvence v jednotkách hertzů a tvar kmitání připomíná konzolu zatíženou na konci silou.

#### **7.1.2 Návětrný úhel**

Návětrný úhel byl zvolen v nejméně příznivé hodnotě, který je podle ČSN EN 1993-3-1 [6], odstavce B.2.1.1 (5) odkloněn o  $30^\circ$  od nominálního směru větru, tedy rovnoběžného s normálou k panelu konstrukce. Protože nakonec zvolená varianta příhradové konstrukce stožáru nebyla při čelním pohledu v nominálním směru větru symetrická, byly vytvořeny vždy 2 zatěžovací stavy lišící se pouze směrem sil, oba vůči sobě na opačnou stranu. Pro každý prut nebo styčník byla uvažována nejméně příznivou variantu.

### **7.1.3 Společná část výpočtu zatížení větrem budov i stožárů**

Stejně jak se počítá zatížení větrem podle metodiky eurokódu 1 [4], tak i u výpočtu zatížení stožáru větrem platí 5 stejných větrných oblastí. Tyto oblasti se liší pouze rychlostí větru. O použití konkrétní větrné oblasti pro výpočet rozhoduje mapa české republiky s barevným rozlišením.

Také zde platí i 5 kategorií terénu, z nichž má cenu požívat kategorii 0 (moře a přímořské oblasti), kategorii 1 (jezera nebo vodorovná plochá krajina bez překážek) nebo kategorii 2 (krajina s nízkou vegetací, jako je tráva nebo izolované překážky). Kategorie 3 a 4 v ohledu na umístění stožárů v terénu nemají využití pro případy, když je terén zalesněný a stožár nesahá vysoko nad lesní porost. V případě vykácení se změnění kategorie terénu a tím i velikost působení větru.

Nyní do výpočtu zavedeme veličiny, které jsou po výšce stožáru konstantní. Jsou to 1. vlastní frekvence stožáru, 2 konstanty  $C_1$  a  $C_2$ , které závisí na tvaru půdorysu stožáru. Do výpočtu vstupují součinitelé: součinitel směru větru  $c_{dir}$ , hustota vzduchu  $\rho$ , součinitel turbulence  $k_1$ , součinitel orografie  $c_0$ , součinitel ročního období  $c_{season}$  a integrační doba pro stanovení střední rychlosti větru  $T$ . Doporučené hodnoty jsou uvedeny v ČSN EN 1991-1-4 [4].

Na začátku do výpočtu vstupuje geometrie panelu konstrukce. Panel je tvarem se opakující část celé konstrukce. U příhradové konstrukce stožáru jím může být 1 pole příhrady. Pro každý panel je z hlediska geometrie pro výpočet důležitá výška těžiště panelu  $z$  od země, šířka  $b$  a výška panelu  $h$ . Poté se určí návětrná plocha panelu konstrukce  $A_c$  a součinitel plnosti  $\varphi$  určený podílem plochy panelu  $A_c$  a návětrné plochy  $A$ . Pro jednotlivé geometricky stejné panely se výpočet neliší. U budov se používá součinitel v hodnotě 1,0.

$$\varphi = A_c/A \quad (1)$$

Poté z těchto parametrů můžeme určit součinitel drsnosti  $c_r$ , kde  $z_0$  je parametr drsnosti terénu a  $z_{min}$  minimální výška. V této fázi se výpočet rozděluje pro každý panel zvlášť díky různé výšce každého panelu nad zemí.

$$c_r = 0,19(z_0/0,05)^{0,07} \ln[\max(z; z_{min})/z_0] \quad (2)$$

Získaný součinitel drsnosti terénu použijeme pro výpočet střední rychlosti větru  $v_m$ . Nejdříve však musíme určit základní rychlost větru  $v_b$  z výchozí hodnoty základní rychlosti větru  $v_{b,0}$  určené z mapy větrných oblastí.

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0} \quad (3)$$

$$v_m = c_0 c_r v_b \quad (4)$$

Poté přejdeme k charakteristickému maximálnímu dynamickému tlaku  $q_p$ , který je závislý na intenzitě turbulence  $I_v$ . V této fázi se výpočet rozchází s postupem výpočtu zatížení budov větrem. Pro získání hodnoty charakteristického maximálního dynamického tlaku v kilonewtonech musíme výsledek vydělit tisícem.

$$I_v = \frac{k_1}{c_0 \ln(z/z_0)} \quad (5)$$

$$q_p = \frac{(1 + 7I_v)}{2} \rho v_m^2 \quad (6)$$

Rozdíl je v dynamickém chování stožáru při působení větru oproti budovám, které nejsou do takové míry dynamicky namáhány. Nicméně u mrakodrapů se při výpočtu zatížení větrem musí postupovat obdobně jako u stožárů.

#### **7.1.4 Výpočet středního zatížení panelu stožáru větrem**

První veličinu, kterou můžeme určit z vlastností geometrie panelu a celé konstrukce, je měřítko délky turbulence  $L$ . Jejím dosazení do součinu s 1. vlastní frekvencí  $n_{1x}$  a střední rychlosti větru  $v_m$  dostaneme bezrozměrnou frekvenci v stanovenou pro 1. vlastní frekvenci konstrukce  $f_L$ .

$$L = 300 \left[ \frac{\max(z; z_{min})}{0,05} \right]^{(0,76+0,05 \ln z_0)} \quad (7)$$

$$f_L = n_{1x} L v_m \quad (8)$$

dále se ve výpočtu objevují 3 bezrozměrné součinitele  $K_1$ ,  $K_2$  a  $K_\theta$ . Tyto součinitele závisí na způsobu proudění vzduchu kolem prutů konstrukce při větru. Plochu panelu konstrukce rozdělíme na plochu trubkových prutů, kde se ještě rozlišuje podkritické (plocha  $A_c$ ) a nadkritické obtékání vzduchu kolem prutu (plocha  $A_{c,sup}$ ), a plochých prutů (plocha  $A_f$ ). Součet těchto tří dílčích ploch dá opět plochu panelu konstrukce  $A_s$ . Součinitel  $K_1$  závisí na

podílu těchto dílčích ploch na celkové ploše panelu konstrukce. Součinitel  $K_2$  závisí pouze na součiniteli plnosti panelu konstrukce  $\varphi$ .  $K_\theta$  závisí na součinitelích  $K_1$  a  $K_2$  a na směru větru.

$$A_s = A_f + A_c + A_{c,sup} \quad (9)$$

$$K_1 = 0,55 \frac{A_f}{A_s} + 0,8 \frac{A_c + A_{c,sup}}{A_s} \quad (10)$$

$$K_2 = \begin{cases} 0,2 & \text{pro } 0 \leq \varphi \leq 0,2 \text{ a } 0,8 \leq \varphi \leq 1 \\ \varphi & \text{pro } 0,2 < \varphi \leq 0,5 \\ 1 - \varphi & \text{pro } 0,5 < \varphi < 0,8 \end{cases} \quad (11)$$

$$K_\theta = 1 + K_1 K_2 \sin^2 2\theta \quad (12)$$

Po určení součinitelů  $K_1$ ,  $K_2$  a  $K_\theta$  musíme ještě určit 2 součinitele  $C_1$  a  $C_2$ , které jsou závislé pouze na tvaru půdorysu stožáru. Pro trojúhelníkový půdorys mají tyto součinitele hodnoty  $C_1=1,9$  a  $C_2=1,4$  a pro 4boký půdorys  $C_1=2,25$  a  $C_2=1,5$ . Poté můžeme přejít k tvarovým součinitelům  $c_{f,0,f}$ ,  $c_{f,0,c}$  a  $c_{f,0,c,sup}$ . Protože navrhovaný stožár má pouze pruty s kruhovým průřezem trubek podkritické obtékaných vzduchem, postačí nám pouze součinitel  $c_{f,0,c}$ . Všechny 3 tvarové součinitele závisí pouze na součiniteli plnosti  $\varphi$  a součinitelích  $C_1$  a  $C_2$ .

$$c_{f,0,c} = 1,9 - \sqrt{(1 - \varphi)(2,8 - 1,4C_1 + \varphi)} \quad (13)$$

Pak už můžeme vypočítat hodnotu celkového tvarového součinitele z následujícího vztahu  $c_{f,s,0}$ . Po zavedení směru větru pomocí úhlu  $\theta$  mezi směrem větru a normálou k ploše panelu získáme tvarový součinitel konstrukce pro panel  $c_{f,s}$ .

$$c_{f,s,0} = c_{f,0,f} \frac{A_f}{A_s} + c_{f,0,c} \frac{A_c}{A_s} + c_{f,0,c,sup} \frac{A_{c,sup}}{A_s} \quad (14)$$

$$c_{f,s} = K_\theta c_{f,s,0} \quad (15)$$

Když přičteme tvarový součinitel příslušenství, do kterého řadíme antény a kabely,  $c_{f,a}$  k tvarovému součiniteli konstrukce  $c_{f,s}$ , dostaneme tvarový součinitel  $c_f$  pro panel konstrukce. Získat potřebné vstupní údaje příslušenství potřebné pro výpočet ale není snadné, a ani se mi je prakticky nepodařilo získat od žádného výrobce. Detailněji jsou tyto parametry popsány v kapitole 7.2.

$$c_f = c_{f,s} + c_{f,a} \quad (16)$$

Střední hodnotu zatížení panelu konstrukce větrem  $F_{m,w}$  v kN získáme z maximálního dynamického tlaku  $q_p$ , intenzitě turbulence  $I_v$ , referenční plochy panelu  $A_{ref}$  a tvarového součinitele panelu  $c_f$ .

$$F_{m,w} = \frac{q_p}{1 + 7I_v} A_{ref} c_f \quad (17)$$

Pro posouzení na mezní stav únosnosti musíme ještě znát hodnotu zatížení panelu konstrukce při nárazech větru  $F_{t,w}$ . Určení její hodnoty je podrobně popsáno v kapitole 7.1.5

### **7.1.5 Výpočet ekvivalentního nárazového zatížení panelu stožáru větrem**

Ekvivalentní nárazové zatížení větrem můžeme dopočítat až po určení součinitele konstrukce  $c_s c_d$ , který se počítá podle ČSN EN 1991-1-4 [4], kapitoly 6.3.1 Výpočet hodnoty ekvivalentního zatížení panelu stožáru větrem  $F_{t,w}$  se dopočítá jedním vztahem na konci této kapitoly. Panely stožáru zatěžujeme působením větru právě hodnotou ekvivalentního nárazového zatížení větrem.

#### **7.1.5.1 Součinitel konstrukce $c_s c_d$**

Nyní přecházíme k určení součinitele konstrukce  $c_s c_d$ . Ten se určuje ze dvou složek – odezvy pozadí a rezonance a využije se pro určení maximální hodnoty zatížení stožáru větrem. Na začátku jeho výpočtu vystupují bezrozměrné součinitele  $\eta_h$  a  $\eta_b$ . Ty dosadíme do jednoduchých vztahů a získáme aerodynamické admitance  $R_h$  a  $R_b$  pro základní tvar kmitu (pro 1. vlastní frekvenci)

$$\eta_h = \frac{4,6 * h}{L} f_L \quad (18)$$

$$\eta_b = \frac{4,6 * b}{L} f_L \quad (19)$$

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 * \eta_h^2} (1 - e^{-2 * \eta_h}); R_h = 1 \text{ pro } \eta_h = 0 \quad (20)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 * \eta_b^2} (1 - e^{-2 * \eta_b}); R_b = 1 \text{ pro } \eta_b = 0 \quad (21)$$

Následně ve výpočtu určíme jednostranné spektrum rozptýlu  $S_L$  z bezrozměrné frekvence  $f_L$ . Rezonanční součást odezvy ovšem závisí na logaritmickém dekrementu útlumu  $\delta$ , který se

skládá z 3 složek. První složka  $\delta_s$  je konstrukční útlum – představuje tlumení pohlcování kinetické energie pohybu konstrukce a její přeměnu v teplo vlivem deformace. Pro ocelové příhradové věže se svařovanými pruty se bere hodnota 0,02. Druhá složka  $\delta_a$  je aerodynamický útlum, který závisí na součiniteli síly  $c_f$ , který dostaneme před určením střední hodnoty zatížení panelu konstrukce větrem. Poslední složka  $\delta_d$  je reprezentována přidavnými tlumiči a hmotami pro úpravu dynamických vlastností konstrukce.

$$S_L = \frac{6,8 * f_L}{(1 + 10,2 * f_L)^{5/3}} \quad (22)$$

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \quad (23)$$

$$\delta_a = \frac{c_f \rho b v_m}{2 n_1 m_e} \quad (24)$$

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2\delta} S_L R_h R_b \quad (25)$$

Druhou složku součinitele konstrukce  $c_s c_d$  – odezvu pozadí vypočteme z výšky celé konstrukce, geometrie panelu a měřítka délky turbulence. Do výpočtu je potřeba dosadit šířku panelu  $b$ , výšku konstrukce  $h$  a měřítko délky turbulence  $L$ . Z obou složek a první vlastní frekvence získáme frekvenci přechodů s kladnou směrnici  $v$ . Ze získané hodnoty a doby integrace při stanovení střední rychlosti větru můžeme vypočítat součinitel maximální hodnoty  $k_p$ .

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9[(b + h)/b]^{0,63}} \quad (26)$$

$$v = n_{1x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \quad (27)$$

$$k_p = \max \left[ \sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \ln(vT)}}; 3 \right] \quad (28)$$

Nyní máme hodnoty všech potřebných veličin pro určení součinitele konstrukce  $c_s c_d$ .

$$c_s c_d = \frac{1 + 2k_p I_V(z_s) \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_V(z_s)} \quad (29)$$

### **7.1.5.2 Ekvivalentní nárazové zatížení větrem**

Tento součinitel dosadíme do vzorce pro určení maximální hodnoty zatížení panelu stožáru větrem  $F_{t,w}$ , která vychází ze střední hodnoty zatížení panelu stožáru větrem  $F_{m,w}$  jako její násobek.

$$F_{t,w}(z) = F_{m,w}(z) \left[ 1 + \left( 1 + 0,2 \left( \frac{z_m}{h} \right)^2 \right) \frac{[1 + 7I_V(z_e)]c_s c_d - 1}{c_0(z_m)} \right] \quad (30)$$

### **7.1.6 Výpočet zatížení odtrháváním vírů**

Vnitřní síly vyvolané odtrháváním vírů, které způsobuje kmitání konstrukce kolmo ke směru větru, potřebujeme pro určení rozkmitu napětí v detailech, abychom je mohli posoudit na mezní stav únavy.

Na začátku je potřeba si určit na základ tvaru průřezu a druhu konstrukce vstupní údaje, které jsou konstantní pro všechny panely. Pro průřezy z kruhových trubek použijeme Strouhalovo číslo  $St=0,18$  a pro konzolové konstrukce použijeme parametry  $m=1$  a  $n=1$ . Prvním krokem výpočtu zatížení odtrháváním vírů je určení kritické rychlosti větru pro 1. vlastní tvar kmitání, při jejímž překročení může docházet k odtrhávání vírů.

$$v_{crit,i} = \frac{bn_{1,x}}{St} \quad (31)$$

$$Sc = \frac{2\delta_s m_{i,e}}{\rho b^2} \quad (32)$$

Za  $b$  dosazujeme šířku průřezu, tedy vnější průměr nárožníku. Protože uvažujeme pouze nárožníky, je výhodné zavést do  $m_{i,e}$  hmotnost na jednotku délky nárožníku.

$$Re = \frac{bv_{crit,i}}{v} \quad (33)$$

Dalším potřebným součinitelem pro určení zatížení odtrháváním vírů je  $c_{lat}$ , který se určí z  $c_{lat,0}$  z tabulky E.3 [4], který se určuje z  $Re$  podle obrázku E.2 [4].

Nyní však následuje složitější část výpočtu, ve které je potřeba určit korelační délku  $L_i$ . Postup podle normy [4] byl pro mě nepochopen, ale po konzultaci byl dle rady vedoucího diplomové práce použit jsem následující postup. Z tabulky E.4 [4] byla použita nejdříve korelační délku z prvního řádku a dopočteme poměr maximální výchylky a šířky příhradové

konstrukce  $y_{F,max}/b$ . Cestou však musíme projít přes součinitel  $K_w$ , který závisí na poměru korelační délky a šířky příhradové konstrukce  $L_i/b$ . Za součinitel  $\lambda$  dosazujeme poměr výšky a šířky konstrukce určené váženým průměrem po výšce konstrukce.

$$\lambda = \frac{h}{b_{prům}} \quad (34)$$

$$K_w = 3 \frac{L_i/b}{\lambda} \left[ 1 - \frac{L_i/b}{\lambda} + \frac{1}{3} \left( \frac{L_i/b}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (35)$$

Nyní musíme ověřit, zda nám spadá poměr maximální výchylky a šířky příhradové konstrukce  $y_{F,max}/b$  do intervalu určeného 1. sloupcem tabulky E.4 [4].

$$\frac{y_{F,max}}{b} = \frac{1}{St^2} \frac{1}{Sc} K K_w c_{lat} \quad (36)$$

Pokud nám spadá vypočtená hodnota do správného intervalu, nemusíme zkoušet ostatní řádky a přecházíme k výpočtu zatížení odtrháváním vírů. Pro konkrétní panel ještě musíme určit výchylku  $\phi_i$  jako poměr výchylky v místě panelu a maximální výchylky stožáru. Poté můžeme přikročit k výpočtu zatížení nárožníku v části ohraničené hranicemi panelu konstrukce stožáru velikost zatížení v kN. Toto zatížení budeme směřovat co nejvíce kolmo k maximálnímu směru větru.

$$F_w = m_s (2\pi n_{i,x})^2 \phi_i y_{F,max} \quad (37)$$

hmotnost  $m_s$  je použita jako hmotnost úseku nárožníku v hraničících panelu konstrukce stožáru. Uvažovali jsme ji stejně jako  $m_{i,e}$  pro 1 nárožník, takže vypočteným zatížením zatěžujeme všechny 4 nárožníky ve výšce panelu konstrukce stožáru.

Odtrhávání vírů by mělo podle ČSN EN 1991-1-4 [4] nastat pouze v korelační délce, pokud budeme uvažovat odtrhávání vírů po celé výšce stožáru, dostaneme se na stranu bezpečnou. Tzn., že rozkmit napětí v detailech bude větší a pro styčníky bude vycházet menší počet cyklů do vzniku únavového porušení.

## **7.2 Vstupní parametry antén a jiného vybavení stožáru**

Tato kapitola se vstupními daty do výpočtu uvedeného v kapitole 6.1.4 je zařazena záměrně sem z důvodu, že potřebné hodnoty by se měly získat od výrobce antén. Ovšem získat



potřebné hodnoty, abychom je následně mohli dosadit do výpočtu, není jednoduché. V textu této kapitoly je popsáno pátrání po 2 veličinách.

Ještě než můžeme získat hodnotu celkového zatížení na panel, musíme do výpočtu vložit kromě parametrů vlastní nosné konstrukce stožáru také parametry antén a dalšího technického vybavení stožárů. Jedná se o odpor větru vyjádřený tvarovým součinitelem  $c_{f,a}$  a Reynoldsovvým číslem  $Re$  nutným pro výpočet bočního kmitání kolmo na směr větru.

Výrobci antén by měli podle ČSN EN 1993-3-1 [6], odstavce B.2.4(1) antény testovat ve větrném tunelu a poskytovat tvarový součinitel  $c_{f,a}$  a Reynoldsovo číslo  $Re$ . Obě tyto hodnoty mají svůj extrém způsobující maximální možné zatížení pro konkrétní anténu. Pro tvarový součinitel to je  $c_{f,a}=0,7$  a  $Re=1,2$ . Obě veličiny jsou bezrozměrné (nemají žádnou jednotku).

Bylo kontaktováno několik výrobců antén, abych si udělal přehled o tom, jak je to s dostupností těchto dvou veličin. Od jednoho výrobce byly získány pro 3 antény pouze sílu čelně a z boku na anténu pro rychlost větru 55 m/s. Bohužel to nebyly přímo požadované 2 veličiny, ale dá se pak dojít k hodnotě zatížení větrem na panel konstrukce sečtením zatížení od větru na nosnou konstrukci a k němu přičíst sílu z obdrženého materiálu od výrobce. Najisto ale nemůžeme spoléhat, že jsou to hodnoty zatížení větrem na anténu, protože je možné, že se jedná o hodnoty potřebné k návrhu uchycení antény ke konstrukci stožáru.

U jiného výrobce byla zjištěna pouze skutečnost, že pro navrhování anténních stožárů používají extrémní hodnoty tvarového součinitele i Reynoldsova čísla a že zkoušení ve větrném tunelu neprovádějí, protože je to nákladné na finance.

Od několika výrobců nepřišla žádná odpověď. Bohužel jedna věc je anténa a ta má své součásti, které se podle druhu využití liší. Pravděpodobně proto nebylo možné získat požadované hodnoty tvarového součinitele i Reynoldsova čísla.

### **7.3 Porovnání zatížení větrem na jednotlivých variantách konstrukce stožáru**

Oproti srovnávání 3 variant ztužení zatížených jednotnou velikostí zatížení byly také varianty 1 a 2 srovnány při zatížení nárazovým větrem. Zatížení bylo vypočteno podle

postupu uvedenému v kapitole 6.1. Nejdříve musely být vybrány antény, které výrazně ovlivní zatížení větrem.

### **7.3.1 Navrhnuté antény na stožáru**

Z materiálů s technickými parametry antén byly vybrány 2 kruhové antény s průměrem 1300 mm a jedna obdélníková široká 500 mm a vysoká 1000 mm. Materiály s použitými technickými daty antén obsahuje příloha č. 8.

Na návětrné straně stožáru jsou uvažovány antény K 72 32 4 (výrobce Kathrein, hmotnost 12 kg), Alter 10G (výrobce Summit development, hmotnost 34 kg) a Microwapp 1070 (výrobce BTV, hmotnost 26 kg) v pořadí shora dolů. Potřebné parametry byly zvoleny na základě průzkumu u výrobců telekomunikačních antén v hodnotách  $c_{f,a,0}=0,7$  a  $R_e=1,2$ .

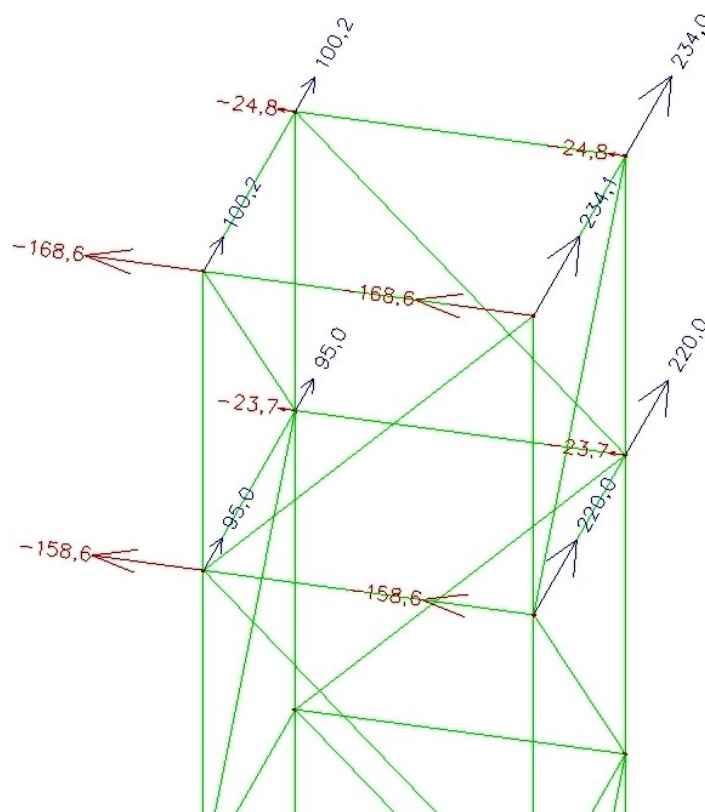
### **7.3.2 Volba 1 varianty stožáru pro konečný návrh**

U variant 1 a 2 konstrukce stožáru s vybranými anténami po zatížení větrem byly zjištěny zajímavé skutečnosti. Při jejich porovnávání vnitřních sil překvapivě vycházela větší napětí v nárožnicích varianty 2, protože oproti variantě 1 se předpokládalo rozložení části síly v nárožnicích do diagonál. Tato skutečnost je zřejmě způsobena větší návětrnou plochou panelů konstrukce díky dvojnásobnému počtu diagonál oproti počtu diagonál ve variantě 1.

Protože při menším počtu prutů vycházelo v nárožnicích menší napětí, pro konečný návrh byla zvolena varianta 1. Při návrhu konstrukce byly dodatečně upravovány průřezy nárožníků, což si vyžádalo další iterace při výpočtu ekvivalentního nárazového zatížení větrem.

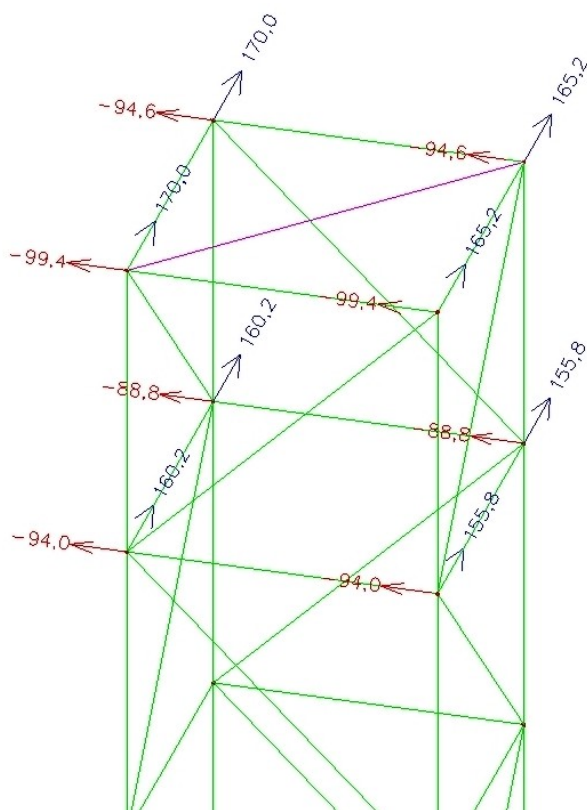
Po provedení výpočtu mě překvapily velké rozdíly v posunutích uzlů konstrukce mezi hranami návětrné strany stožáru. Rozdíl posunutí uzlů mezi levou a pravou stranou ve vrcholu stožáru činil až 130 mm, což je na 1000 mm délky horizontálních výplňových prutů velká hodnota. Posunutí uzlů konstrukce od zatížení větrem je znázorněno na obrázku 7.1. Výrazně velkým deformováním půdorysu ze čtverce na kosočtverec by časem nastalo vyčerpání pevnosti styčnickových plechů ve směru menší ohybové tuhosti vlivem málocyklové únavy.

obrázek 7.1 – deformace konstrukce od zatížení větrem tvaru půdorysu



Protože by konstrukce nemohla podle takového návrhu fungovat a pravděpodobně by časem došlo k jejímu kolapsu, byla přidána přibližně do třetin výšky a na vrchol stožáru horizontální ztužidla půdorysného tvaru. Toto ztužení příznivě změnilo deformace ve prospěch správné funkce telekomunikačních antén, která je závislá na směrovém vychýlení. Rovněž tvar půdorysu zůstal po změně návrhu ve všech úrovních jako čtverec. Posunutí uzlů konstrukce způsobené zatížením větrem po přidání horizontálních ztužidel můžeme vidět na obrázku 7.2.

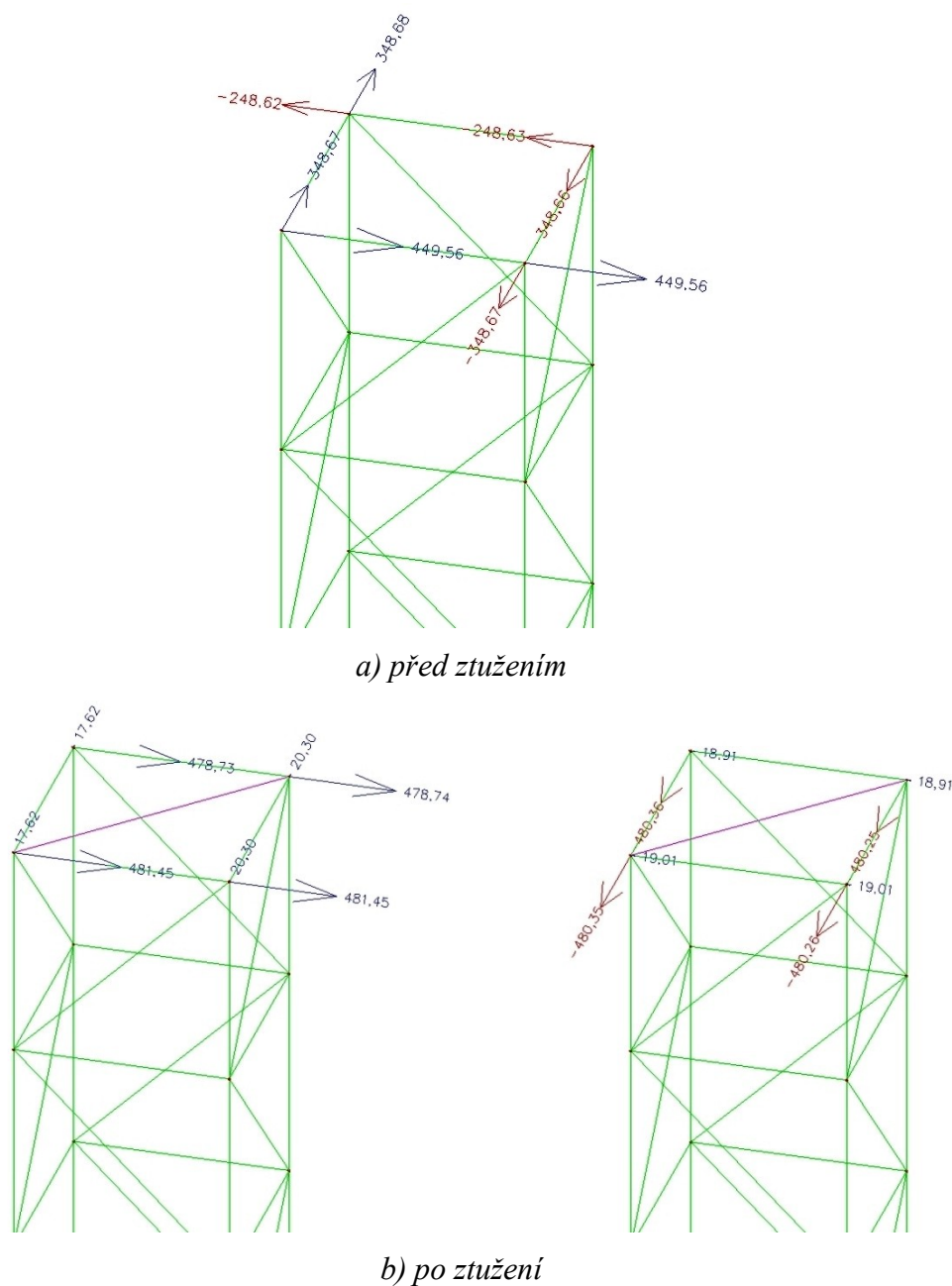
obrázek 7.2 – deformace konstrukce od zatížení větrem po přidání ztužidel (fialový prut)



Kromě deformací konstrukce se také při ztužení změnily dynamické vlastnosti konstrukce.

1. vlastní tvar, který původně měnil čtvercový tvar půdorysu na kosočtverec, se výrazně změnil na kmitání posuny čtvercového půdorysu podél jedné z jeho hran. 2. vlastní tvar byl oproti 1. vlastnímu tvaru otočený o  $90^\circ$ . 1. vlastní frekvence je pak totožná s 2. vlastní frekvencí, obě vzrostly z 2,06 na 2,42 Hz. Na obrázku 7.3 je porovnání 1. vlastních tvarů kmitání před a po přidání horizontálních ztužidel.

obrázek 7.3 – změna 1. vlastních tvarů kmitání před a po přidání horizontálních ztužidel



Díky ztužení se přerozdělily i normálové síly v prutech konstrukce. V třetím montážním dílci bylo po přepočítání zatížení větrem nutné zesílit diagonály. Rozdíl nebyl ve velikosti zatížení, ale v deformacích konstrukce. Celkově se změna při dočasně návrhové kombinaci projevila poklesem napětí v nárožnících o  $\frac{1}{4}$  a naopak vzrůstem napětí v diagonálách horních montážních dílců.

I když mají pruty příhradové konstrukce menší využití, jejich dimenze nebyly snižovány, protože by konstrukce nemusela vyhovět v mezním stavu použitelnosti. Z posunutí uzlů byly

vypočteny úhlové výchylky menší než  $1^\circ$ , což může být hodnota nepřesahující mezní hodnotu pro správnou funkci antén.

### **7.3.3 Výpočet zatížení větrem na 1 vybraný panel stožáru**

V této části kapitoly je uveden výpočet zatížení nejvyššího panelu konstrukce stožáru s na návětrné straně s anténami. Návětrný úhel bude odkloněn od normály k panelu o  $30^\circ$ . Byla zvolena větrná oblast 3, pro kterou je hodnota  $v_{b,0}=27,5$  m/s a kategorie terénu 1, kam patří jezera nebo rovná krajina bez překážek. Tuto kategorii terénu nejvíce vystihuje nejnepříznivější situace z důvodu možného pokácení stromů, které mohou být v porostu kolem stožáru. Pokud by se tak stalo, nebude stožár chráněn před větrem žádnou překážkou.

Konstrukce stožáru je vysoká 29 metrů, z nichž spodních 10 metrů má proměnnou šířku, která se odspoda snižuje z 2 metrů na 1 metr. Šířka jednoho metru je na horní části konstrukce stožáru konstantní. Průměrná šířka stožáru se vypočte váženým průměrem.

$$b = \frac{(2 + 1)/2 * 10 + 1 * 19}{29} = 1,19m$$

$$h = 29m$$

Panel má šířku  $b_i = 1m$  a výšku  $h_i = 1m$  a z jeho pozice na konstrukci můžeme určit výšku jeho těžiště  $z_i = 28,5m$ .

Součinitel směru větru a součinitel ročního období zůstává roven běžné hodnotě doporučené v normě [4].

$$c_{dir} = 1,0$$

$$c_{season} = 1,0$$

$$v_b = c_{dir}c_{season}v_{b,0} = 1 * 1 * 27,5 = 27,5m/s$$

Pro kategorii terénu 1 použijeme tyto hodnoty parametru drsnosti terénu a minimální výšky.

$$z_0 = 0,01m$$

$$z_{min} = 1m$$

Nyní vypočteme střední rychlost větru. Součinitel orografie a součinitel turbulence zvolíme v doporučené hodnotě  $c_0 = 1,0$  a  $k_1 = 1,0$ . Hustota vzduchu  $\rho$  se uvažuje konstantou. Poté přejdeme k výpočtu charakteristického dynamického tlaku větru  $q_p$ .

$$c_r = 0,19 \left( \frac{z_0}{0,05} \right)^{0,07} \ln \frac{\max(z_i; z_{min})}{z_0} = 0,19 \left( \frac{0,01}{0,05} \right)^{0,07} \ln \frac{\max(28,5; 1)}{z_0} = 1,350$$

$$v_m = c_0 c_r v_b = 1,0 * 1,350 * 27,5 = 37,14 \text{ m/s}$$

$$I_V = \frac{k_1}{c_0 * \ln \frac{z_i}{z_0}} = \frac{1}{1 * \ln \frac{28,5}{0,05}} = 0,126$$

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$q_p = \frac{\frac{1 + 7I_V}{2} \rho v_m^2}{1000} = \frac{1 + 7 * 0,126}{2} 1,25 * 37,14^2 / 1000 = 1,62 \text{ kN/m}^2$$

Tímto jsme dokončili část výpočtu zatížení větrem, která je shodná s výpočtem zatížení větrem pro budovy. Druhou část výpočtu začneme s výpočtem návětrných ploch a součinitele plnosti  $\varphi$ .

$$\text{návětrná plocha nárožníků:} \quad 2 * 0,0761 * 1 = 0,15 \text{ m}^2$$

$$\text{návětrná plocha dolní horizontály:} \quad 0,0318 * 1 = 0,02 \text{ m}^2$$

$$\text{návětrná plocha horní horizontály:} \quad 0,0761 * 1 = 0,08 \text{ m}^2$$

$$\text{návětrná plocha diagonály:} \quad 0,0318 * 1,42 = 0,04 \text{ m}^2$$

$$A_{c,i} = b_i h_i = 1 * 1 = 1 \text{ m}^2$$

$$A = 0,15 + 0,02 + 0,08 + 0,04 = 0,29 \text{ m}^2$$

$$\varphi = \frac{A}{A_{c,i}} = \frac{0,29}{1} = 0,289$$

Celá konstrukce stožáru má půdorys tvaru čtverce a je tvořena trubkami, proto celá návětrná plocha připadne  $A_c$ .

$$A_f = 0; A_c = A = 0,29 \text{ m}^2; A_{c,sup} = 0$$

$$A_s = A_f + A_c + A_{c,sup} = 0 + 0,29 + 0 = 0,29 \text{ m}^2$$

$$C_1 = 2,25; C_2 = 1,50$$

$$K_1 = 0,55 \frac{A_f}{A_s} + 0,8 \frac{A_c + A_{c,sup}}{A_s} = 0,55 \frac{0}{0,29} + 0,8 \frac{0,29 + 0}{0,29} = 0,8$$

$$\varphi = 0,289 \Rightarrow K_2 = \varphi = 0,289$$

$$K_\Theta = 1 + K_1 K_2 \sin^2 2\Theta = 1 + 0,8 * 0,289 * \sin^2 2 * 30^\circ = 1,174$$

$$c_{f,0,f} = 1,76C_1 - \sqrt{(1 - C_2)(2,8 - 1,14\varphi + \varphi^2)} = 2,573$$

$$c_{f,0,c} = 1,9 - \sqrt{(1 - \varphi)(2,8 - 1,14C_1 + \varphi^2)} = 1,290$$

$$c_{f,0,c,sup} = C_1(1 - C_2\varphi) + (C_1 + 0,875)\varphi^2 = 1,535$$

$$c_{f,s,0} = c_{f,0,f} \frac{A_f}{A_s} + c_{f,0,c} \frac{A_c}{A_s} + c_{f,0,c,sup} \frac{A_{c,sup}}{A_s} = 0 + 1,290 * 1 + 0 = 1,29$$

$$c_{f,s} = K_\Theta c_{f,s,0} = 1,174 * 1,29 = 1,513$$

Na tomto panelu konstrukce je navržena anténa Kathrein K 72 32 4 s plochou  $0,5 \text{ m}^2$  a hmotností  $12 \text{ kg}$ . Protože anténa má největší aerodynamický odpor při směru větru rovnoběžném s normálou k ploše antény, konzervativně uvažujeme tuto nejnepríznivější polohu. Anténa stíní panel konstrukce jen velmi málo, proto se součinitel  $K_A$  nesnižuje a zůstává roven  $1,0$ .

$$A_a = 0,5 \text{ m}^2; c_{f,a,0} = 0,7; R_e = 1,2; \psi = 90^\circ; K_A = 1,0$$

$$c_{f,a} = K_A c_{f,a,0} \sin^2 \psi = 1,0 * 0,7 * 1^2 = 0,7$$

Po výpočtu tvarového součinitele antény  $c_{f,a}$  můžeme vypočítat velikost středního zatížení panelu stožáru větrem  $F_{m,w}$ .

$$A_{ref} = A_s + A_a = 0,29 + 0,5 = 0,79 \text{ m}^2$$

$$c_f = c_{f,s} + c_{f,a} = 1,513 + 0,7 = 2,213$$

$$F_{m,w} = \frac{q_p}{1 + 7I_V} c_f A_{ref} = \frac{1,62}{1 + 7 * 0,126} 2,213 * 0,79 = 1,51 \text{ kN}$$

Ekvivalentní nárazové zatížení větrem závisí na dynamických vlastnostech konstrukce stožáru. Do výpočtu zavedeme hmotnost  $m_e$  na jednotku výšky,  $1$ . vlastní frekvenci konstrukce  $n_{l,x}$  spočtenou v programu Scia Engineer a logaritmický dekrement konstrukčního útlumu  $\delta_s$ .

$$m_e = \frac{m}{h} = \frac{2584,97}{29} = 89,14 \text{ kg/m}; n_{l,x} = 2,42 \text{ Hz}; \delta_s = 0,02$$



$$L = 300 \frac{\max(z_i; z_{min})^{(0,76+0,05 \cdot \ln z_0)}}{200} = 300 \frac{28,5^{0,53}}{200} = 106,87m$$

$$f_L = \frac{n_{1,x} L}{v_m} = \frac{2,42 * 106,87}{37,14} = 6,96$$

$$\eta_h = 4,6 \frac{z_i}{L} f_L = 4,6 * \frac{28,5}{106,87} * 6,96 = 8,54$$

$$\eta_b = 4,6 \frac{b_i}{L} f_L = 4,6 * \frac{1}{106,87} * 6,96 = 0,30$$

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2\eta_h^2} (1 - e^{-2\eta_h}) = 0,110$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2\eta_b^2} (1 - e^{-2\eta_b}) = 0,827$$

$$S_L = \frac{6,8 f_L}{(1 + 10,2 f_L)^{5/3}} = 0,038$$

$$\delta_a = \frac{c_f \rho v_m}{2 n_{1,x} m_e} = \frac{2,213 * 1,25 * 37,14}{2 * 2,42 * 89,14} = 0,238$$

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2(\delta_s + \delta_a)} S_L R_h R_b = \frac{\pi^2}{2(0,02 + 0,238)} * 0,038 * 0,110 * 0,827 = 0,066$$

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \left( \frac{b_i + h}{L} \right)^{0,63}} = \frac{1}{1 + 0,9 \left( \frac{1 + 29}{106,87} \right)^{0,63}} = 0,712$$

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{R^2 + B^2}} = 2,42 \sqrt{\frac{0,066}{0,066 + 0,712}} = 0,705$$

$$k_p = 2 \ln \sqrt{vT} + \frac{0,6}{2 \ln \sqrt{vT}} = 3,650 \geq 3$$

$$c_s c_d = \frac{1 + k_p I_V \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 I_V} = \frac{1 + 3,650 * 1,62 * \sqrt{0,712 + 0,066}}{1 + 7 * 1,62} = 0,963$$

$$\begin{aligned} F_{t,w} &= F_{m,w} \left[ 1 + \left( 1 + 0,2 \left( \frac{z_i}{h} \right)^2 \right) \frac{(1 + 7 I_V) c_s c_d}{c_0} \right] = \\ &= 1,51 * \left[ 1 + \left( 1 + 0,2 \left( \frac{28,5}{29} \right)^2 \right) \frac{(1 + 7 * 1,62) * 0,963}{1,0} \right] = 1,51 * 1,96 = 2,96 kN \end{aligned}$$

Konstrukci zatěžujeme do uzlů silami ve směru rovnoběžném se směrem větru. Velikost sil v uzlech bude  $\frac{1}{4} F_{t,w}$  a k uzlům na koncích spodní horizontály ještě přičteme síly od

ekvivalentního nárazového zatížení  $F_{t,w}$  větrem pro panel, který se nachází pod vybraným panelem. Výsledné zatížení větrem na konstrukci s anténami je uvedeno v tabulce 7.1.

*tabulka 7.1 – přehled zatížení stožáru větrem na jednotlivých panelech*

| panel | $z_i$ [m] | $A_{ref}$ [m <sup>2</sup> ] | $c_{f,s}$ [-] | $c_{f,a}$ [-] | $c_f$ [-] | $F_{m,w}$ [kN] | $c_s c_d$ [-] | $F_{t,w}$ [kN] |
|-------|-----------|-----------------------------|---------------|---------------|-----------|----------------|---------------|----------------|
| 26    | 28,50     | 0,79                        | 1,513         | 0,700         | 2,213     | 1,51           | 0,963         | 2,96           |
| 25    | 27,50     | 0,23                        | 1,481         | 0,000         | 1,481     | 0,29           | 0,977         | 0,58           |
| 24    | 26,50     | 1,56                        | 1,481         | 0,700         | 2,181     | 2,87           | 0,965         | 5,62           |
| 23    | 25,50     | 0,23                        | 1,481         | 0,000         | 1,481     | 0,28           | 0,979         | 0,56           |
| 22    | 24,50     | 1,56                        | 1,481         | 0,700         | 2,181     | 2,82           | 0,966         | 5,49           |
| 21    | 23,50     | 0,23                        | 1,481         | 0,000         | 1,481     | 0,28           | 0,982         | 0,55           |
| 20    | 22,50     | 0,23                        | 1,481         | 0,000         | 1,481     | 0,28           | 0,984         | 0,55           |
| 19    | 21,50     | 0,23                        | 1,481         | 0,000         | 1,481     | 0,27           | 0,985         | 0,54           |
| 18    | 20,50     | 0,23                        | 1,481         | 0,000         | 1,481     | 0,27           | 0,987         | 0,53           |
| 17    | 19,50     | 0,27                        | 1,504         | 0,000         | 1,504     | 0,32           | 0,989         | 0,64           |
| 16    | 18,50     | 0,27                        | 1,504         | 0,000         | 1,504     | 0,32           | 0,991         | 0,63           |
| 15    | 17,50     | 0,27                        | 1,504         | 0,000         | 1,504     | 0,31           | 0,993         | 0,62           |
| 14    | 16,50     | 0,27                        | 1,504         | 0,000         | 1,504     | 0,31           | 0,996         | 0,61           |
| 13    | 15,50     | 0,27                        | 1,504         | 0,000         | 1,504     | 0,30           | 1,000         | 0,60           |
| 12    | 14,50     | 0,30                        | 1,519         | 0,000         | 1,519     | 0,33           | 1,003         | 0,66           |
| 11    | 13,50     | 0,30                        | 1,519         | 0,000         | 1,519     | 0,32           | 1,007         | 0,65           |
| 10    | 12,50     | 0,30                        | 1,519         | 0,000         | 1,519     | 0,31           | 1,012         | 0,64           |
| 9     | 11,50     | 0,30                        | 1,519         | 0,000         | 1,519     | 0,31           | 1,018         | 0,63           |
| 8     | 10,50     | 0,30                        | 1,519         | 0,000         | 1,519     | 0,30           | 1,025         | 0,62           |
| 7     | 9,48      | 0,33                        | 1,517         | 0,000         | 1,517     | 0,32           | 1,033         | 0,67           |
| 6     | 8,38      | 0,36                        | 1,501         | 0,000         | 1,501     | 0,33           | 1,043         | 0,71           |
| 5     | 7,18      | 0,39                        | 1,488         | 0,000         | 1,488     | 0,34           | 1,056         | 0,75           |
| 4     | 5,85      | 0,44                        | 1,477         | 0,000         | 1,477     | 0,36           | 1,076         | 0,81           |
| 3     | 4,38      | 0,49                        | 1,469         | 0,000         | 1,469     | 0,37           | 1,110         | 0,87           |
| 2     | 2,75      | 0,55                        | 1,471         | 0,000         | 1,471     | 0,35           | 1,173         | 0,92           |
| 1     | 0,95      | 0,57                        | 1,484         | 0,000         | 1,484     | 0,24           | 1,348         | 0,84           |

Zatížení ve výše uvedené tabulce je uvedeno v charakteristických hodnotách. Pro zatížení větrem, které patří mezi nahodilá zatížení, je použit v kombinacích součinitel  $\gamma_q=1,50$ . Zatížení větrem v podobě souhrnné síly je pak rozpočítáno do uzlů příhradové konstrukce a výpočtový model zatěžujeme právě těmito silami, protože je to zaprvé rychlejší a zadruhé nechceme do prutů vnášet ohybové momenty. Přehled sil v charakteristické hodnotě, kterými zatěžujeme výpočtový model konstrukce, je uveden v tabulce 7.2.

tabulka 7.2 – přehled zatížení stožáru větrem do jednotlivých uzlů

| zatížení                         | střední             |                     | nárazové            |                     |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| pořadí<br>horizontály<br>odspoda | $F_{m,L,k}$<br>[kN] | $F_{m,p,k}$<br>[kN] | $F_{t,L,k}$<br>[kN] | $F_{t,p,k}$<br>[kN] |
| 27                               | 0,376               | 0,376               | 0,740               | 0,740               |
| 26                               | 0,540               | 0,483               | 1,065               | 0,952               |
| 25                               | 0,824               | 0,881               | 1,618               | 1,731               |
| 24                               | 0,878               | 0,822               | 1,724               | 1,613               |
| 23                               | 0,808               | 0,864               | 1,581               | 1,691               |
| 22                               | 0,861               | 0,806               | 1,684               | 1,576               |
| 21                               | 0,203               | 0,312               | 0,402               | 0,618               |
| 20                               | 0,308               | 0,201               | 0,611               | 0,398               |
| 19                               | 0,198               | 0,305               | 0,393               | 0,604               |
| 18                               | 0,339               | 0,212               | 0,673               | 0,421               |
| 17                               | 0,226               | 0,373               | 0,449               | 0,741               |
| 16                               | 0,368               | 0,223               | 0,732               | 0,443               |
| 15                               | 0,219               | 0,362               | 0,438               | 0,723               |
| 14                               | 0,356               | 0,216               | 0,713               | 0,432               |
| 13                               | 0,227               | 0,366               | 0,457               | 0,735               |
| 12                               | 0,374               | 0,238               | 0,757               | 0,481               |
| 11                               | 0,233               | 0,367               | 0,474               | 0,747               |
| 10                               | 0,359               | 0,228               | 0,736               | 0,467               |
| 9                                | 0,222               | 0,350               | 0,461               | 0,725               |
| 8                                | 0,355               | 0,228               | 0,745               | 0,478               |
| 7                                | 0,242               | 0,374               | 0,516               | 0,796               |
| 6                                | 0,389               | 0,251               | 0,844               | 0,546               |
| 5                                | 0,261               | 0,403               | 0,582               | 0,899               |
| 4                                | 0,411               | 0,266               | 0,959               | 0,621               |
| 3                                | 0,266               | 0,406               | 0,667               | 1,020               |
| 2                                | 0,345               | 0,226               | 1,027               | 0,671               |
| 1                                | 0,088               | 0,140               | 0,301               | 0,477               |

Síly od ekvivalentního nárazového větru použijeme pro posouzení prutů konstrukce na únosnost. Posouzení konstrukce v mezních stavech únosnosti a použitelnosti je uvedeno v kapitole 8.

#### **7.4 Únavové zatížení**

Chování konstrukce stožáru se bude při působení větru projevovat kmitáním. Konstrukce primárně kmitá ve směru větru, avšak může také nastat odtrhávání vírů na průřezích, které je

příčinou kmitání kolmo ke směru větru. Pro posouzení konstrukce na únavu je zapotřebí nejdříve určit rozkmit napětí v částech styčníků.

#### **7.4.1 Výpočet zatížení pro rozkmit napětí při kmitání ve směru větru**

Při kmitání ve směru větru bude nastávat větší rozkmit napětí než při odtrhávání vírů. Podle ČSN EN 1993-3-1 [6], kapitoly 9 se rozkmit napětí vypočte jako 1,1 násobek rozdílu mezi napětím od střední rychlosti větru s uvážením poryvového součinitele  $G$  a napětím od střední desetiminutové rychlosti větru. Při výpočtu však nestačilo vymodelovat střední zatížení větrem a vynásobit ho poryvovým součinitelem  $G$ , protože pro celou konstrukci nemá jednotnou velikost. Poryvový součinitel se totiž vypočítává pro každý panel z maximálního dynamického tlaku  $q_p$ .

Nejdříve vypočteme základní tlak větru  $q_b$ , který závisí pouze na hustotě vzduchu  $\rho$  a základní rychlosti větru  $v_b$  a má pro všechny panely stejnou velikost. Následně, když vypočteným základním tlakem větru  $q_b$  vydělíme maximální dynamický tlak větru, získáme součinitel expozice  $c_e$ , který má pro každý panel jinou hodnotu.

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2 = \frac{1}{2} 1,25 * 27,5^2 * 10^{-3} = 0,47 \text{ kN/m}^2 \quad (38)$$

$$c_e = \frac{q_p}{q_b} \quad (39)$$

Nyní přejdeme k výpočtu poryvového součinitele, který potřebujeme pro určení jedné ze dvou hodnot napětí, jejichž rozdíl je hledaným rozkmitem napětí. Poryvový součinitel závisí také na součiniteli konstrukce  $c_s c_d$ .

$$G = c_e c_s c_d - 1 \quad (40)$$

Pro přehlednost je uveden výpočet poryvových součinitelů pro panely konstrukce stožáru v tabulce 7.3. Rovněž je v téže tabulce uvedeno i únavové zatížení při kmitání konstrukce stožáru ve směru větru.

tabulka 7.3 – výpočet poryvných součinitelů

| úsek panel | $q_p$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $c_e$ [-] | $c_s c_d$ [-] | $G$ [-] | $F_k$ [kN] |
|------------|-------------------------------|-----------|---------------|---------|------------|
| 1          | 0,73                          | 1,55      | 1,357         | 1,10    | 0,20       |
| 2          | 0,97                          | 2,04      | 1,179         | 1,41    | 0,25       |
| 3          | 1,08                          | 2,29      | 1,115         | 1,55    | 0,25       |
| 4          | 1,16                          | 2,46      | 1,080         | 1,65    | 0,23       |
| 5          | 1,22                          | 2,57      | 1,060         | 1,73    | 0,21       |
| 6          | 1,26                          | 2,66      | 1,046         | 1,78    | 0,20       |
| 7          | 1,29                          | 2,74      | 1,036         | 1,83    | 0,19       |
| 8          | 1,32                          | 2,80      | 1,028         | 1,88    | 0,17       |
| 9          | 1,35                          | 2,85      | 1,021         | 1,91    | 0,18       |
| 10         | 1,37                          | 2,90      | 1,015         | 1,95    | 0,18       |
| 11         | 1,39                          | 2,95      | 1,009         | 1,98    | 0,18       |
| 12         | 1,42                          | 3,00      | 1,005         | 2,01    | 0,18       |
| 13         | 1,44                          | 3,04      | 1,002         | 2,04    | 0,16       |
| 14         | 1,45                          | 3,08      | 0,998         | 2,07    | 0,16       |
| 15         | 1,47                          | 3,11      | 0,995         | 2,10    | 0,16       |
| 16         | 1,49                          | 3,15      | 0,993         | 2,12    | 0,16       |
| 17         | 1,50                          | 3,18      | 0,990         | 2,15    | 0,16       |
| 18         | 1,52                          | 3,21      | 0,989         | 2,18    | 0,13       |
| 19         | 1,53                          | 3,24      | 0,987         | 2,20    | 0,13       |
| 20         | 1,55                          | 3,27      | 0,985         | 2,22    | 0,13       |
| 21         | 1,56                          | 3,30      | 0,983         | 2,25    | 0,13       |
| 22         | 1,57                          | 3,33      | 0,967         | 2,22    | 1,38       |
| 23         | 1,59                          | 3,36      | 0,981         | 2,29    | 0,13       |
| 24         | 1,60                          | 3,38      | 0,966         | 2,26    | 1,37       |
| 25         | 1,61                          | 3,40      | 0,978         | 2,33    | 0,13       |
| 26         | 1,62                          | 3,43      | 0,964         | 2,30    | 0,70       |

#### **7.4.2 Výpočet zatížení pro rozkmit napětí při odtrhávání vírů**

Tato oblast není tak důkladně prozkoumaná z hlediska chování celé konstrukce při odtrhávání vírů. Není totiž jednoznačné, zda budou kmitat pouze pruty na své délce, nebo celá konstrukce. Při výpočtu uvažujeme s méně příznivou možností, při které se konstrukce rozkmitá celá.

Odtrhávání vírů nastane zejména na nárožnicích díky jejich větším vnějším průměrům průřezů z kruhových trubek oproti výplňovým prutům. Na výplňových prutech není

odtrhávání vírů natolik významné, a proto odtrhávání vírů uvažujeme jen u nárožníků. Následující výpočet je uveden pro nejvyšší panel stožáru.

$$St = 0,18; b = 76,1\text{mm}; m = 1; n = 1; m_{1,e} = 7,11\text{ kg/m}; L_{nárož} = 1\text{m}; K = 0,13$$

$$v_{crit,i} = \frac{bn_{1,x}}{St} = \frac{76,1 * 10^{-3} * 2,42}{0,18} = 1,02\text{m/s}$$

$$Sc = \frac{2\delta_s m_{i,e}}{\rho b^2} = \frac{2 * 0,02 * 7,11}{1,25 * (76,1 * 10^{-3})^2} = 39,30$$

$$Re = \frac{bv_{crit,i}}{v} = \frac{76,1 * 10^{-3} * 1,02}{1,50 * 10^{-5}} = 5,19 * 10^3 \rightarrow c_{lat,0} = 0,70 \rightarrow c_{lat} = 0,70$$

$$\lambda = \frac{h}{b_{prům}} = \frac{29}{1,17} = 24,86$$

$$1. \text{ předpoklad: } L_1/b = 6$$

$$K_w = 3 \frac{L_i/b}{\lambda} \left[ 1 - \frac{L_i/b}{\lambda} + \frac{1}{3} \left( \frac{L_i/b}{\lambda} \right)^2 \right] = 3 \frac{6}{24,86} \left[ 1 - \frac{6}{24,86} + \frac{1}{3} \left( \frac{6}{24,86} \right)^2 \right] = 0,56$$

$$\frac{y_{F,max}}{b} = \frac{1}{St^2} \frac{1}{Sc} K K_w c_{lat} = \frac{1}{0,18^2} \frac{1}{39,30} 0,13 * 0,56 * 0,70 = 0,04$$

$$y_{F,max} = \frac{y_{F,max}}{b} b_{panel} = 0,04 * 1 = 0,04\text{m}$$

$$F_w = m_s (2\pi n_{i,x})^2 \phi_i y_{F,max} = 7,11 * 1,0 * (2\pi * 2,42)^2 * 1,00 * 0,04 = 0,07\text{kN}$$

Zatížení na 1 nárožník v hranicích nejvyššího panelu konstrukce vychází v hodnotě 0,07 kN. Tuto hodnotu vydělíme dvěma a vložíme ji do uzlů na koncích počítaného úseku každého ze 4 nárožníků. Síly v uzlech, kde sousedí 2 panely, samozřejmě sčítáme.

Protože pro první i druhý vlastní tvar má konstrukce tutéž vlastní frekvenci, kde ve vlastních tvarech konstrukce kmitá podél jedné strany čtvercového tvaru půdorysu čtverce, budeme nárožníky zatěžovat ve směru kolmém k normále panelu stožáru na stěně příhradové konstrukce s anténami.

Pro ostatní panely stožáru je výpočet zatížení odtrháváním vírů uveden v tabulce 7.4.

tabulka 7.4 – zatížení odtrháváním vírů

| panel | $z_i$ [m] | $v_{crit,1}$ [m/s] | $m_{1,e}$ [kg/m] | $Sc$ [-] | $Re$ [-] | $c_{lat}$ [-] | $y_{F,max}$ [m] | $m_s$ [kg] | $\phi$ [-] | $F_w$ [kN] |
|-------|-----------|--------------------|------------------|----------|----------|---------------|-----------------|------------|------------|------------|
| 26    | 28,50     | 1,02               | 7,11             | 39,30    | 5190,64  | 0,70          | 0,04            | 7,11       | 1,00       | 0,07       |
| 25    | 27,50     | 1,02               | 7,11             | 39,30    | 5190,64  | 0,70          | 0,04            | 7,11       | 0,94       | 0,06       |
| 24    | 26,50     | 1,02               | 7,11             | 39,30    | 5190,64  | 0,70          | 0,04            | 7,11       | 0,88       | 0,06       |
| 23    | 25,50     | 1,02               | 7,11             | 39,30    | 5190,64  | 0,70          | 0,04            | 7,11       | 0,83       | 0,05       |
| 22    | 24,50     | 1,02               | 7,11             | 39,30    | 5190,64  | 0,70          | 0,04            | 7,11       | 0,77       | 0,05       |
| 21    | 23,50     | 1,02               | 7,11             | 39,30    | 5190,64  | 0,70          | 0,04            | 7,11       | 0,71       | 0,05       |
| 20    | 22,50     | 1,02               | 7,11             | 39,30    | 5190,64  | 0,70          | 0,04            | 7,11       | 0,65       | 0,04       |
| 19    | 21,50     | 1,02               | 7,11             | 39,30    | 5190,64  | 0,70          | 0,04            | 7,11       | 0,60       | 0,04       |
| 18    | 20,50     | 1,02               | 7,11             | 39,30    | 5190,64  | 0,70          | 0,04            | 7,11       | 0,54       | 0,04       |
| 17    | 19,50     | 1,20               | 14,32            | 57,99    | 7083,62  | 0,70          | 0,03            | 14,32      | 0,49       | 0,04       |
| 16    | 18,50     | 1,20               | 14,32            | 57,99    | 7083,62  | 0,70          | 0,03            | 14,32      | 0,44       | 0,04       |
| 15    | 17,50     | 1,20               | 14,32            | 57,99    | 7083,62  | 0,70          | 0,03            | 14,32      | 0,39       | 0,04       |
| 14    | 16,50     | 1,20               | 14,32            | 57,99    | 7083,62  | 0,70          | 0,03            | 14,32      | 0,35       | 0,03       |
| 13    | 15,50     | 1,20               | 14,32            | 57,99    | 7083,62  | 0,70          | 0,03            | 14,32      | 0,30       | 0,03       |
| 12    | 14,50     | 1,37               | 18,47            | 57,25    | 9252,07  | 0,70          | 0,03            | 18,47      | 0,26       | 0,03       |
| 11    | 13,50     | 1,37               | 18,47            | 57,25    | 9252,07  | 0,70          | 0,03            | 18,47      | 0,22       | 0,03       |
| 10    | 12,50     | 1,37               | 18,47            | 57,25    | 9252,07  | 0,70          | 0,03            | 18,47      | 0,19       | 0,02       |
| 9     | 11,50     | 1,37               | 18,47            | 57,25    | 9252,07  | 0,70          | 0,03            | 18,47      | 0,15       | 0,02       |
| 8     | 10,50     | 1,37               | 18,47            | 57,25    | 9252,07  | 0,70          | 0,03            | 18,47      | 0,12       | 0,01       |
| 7     | 9,48      | 1,45               | 21,53            | 59,06    | 10454,40 | 0,70          | 0,03            | 22,66      | 0,10       | 0,01       |
| 6     | 8,38      | 1,45               | 21,53            | 59,06    | 10454,40 | 0,70          | 0,03            | 24,82      | 0,08       | 0,01       |
| 5     | 7,18      | 1,45               | 21,53            | 59,06    | 10454,40 | 0,70          | 0,03            | 26,98      | 0,06       | 0,01       |
| 4     | 5,85      | 1,45               | 21,53            | 59,06    | 10454,40 | 0,70          | 0,04            | 30,22      | 0,04       | 0,01       |
| 3     | 4,38      | 1,45               | 21,53            | 59,06    | 10454,40 | 0,70          | 0,04            | 33,45      | 0,02       | 0,01       |
| 2     | 2,75      | 1,45               | 21,53            | 59,06    | 10454,40 | 0,70          | 0,05            | 36,69      | 0,01       | 0,00       |
| 1     | 0,95      | 1,45               | 21,53            | 59,06    | 10454,40 | 0,70          | 0,05            | 41,01      | 0,00       | 0,00       |

## **8. Posouzení konstrukce**

V této kapitole je popsáno zejména posouzení konstrukce v mezním stavu únosnosti. Mezní stav použitelnosti je oproti MS únosnosti velmi jednoduché posoudit, a proto je mu věnována jen malá část této kapitoly. Posouzení na únavu je velmi podobné posouzení styčníků na únosnost. Liší se jen tím, že získané rozkmity napětí již neporovnáváme s únosností částí styčnicku.

## **8.1 Mezní stav únosnosti**

Na únosnost jsou posuzovány samostatně pruty [5] a samostatně styčníky [7] v uzlech konstrukce. Posouzení prutů je popsáno v kapitole 8.1.1. a posouzení styčnicků je uvedeno vzorově pro zástupce z každého druhu styčnicku v kapitole 8.1.2.

### **8.1.1 Mezní stav únosnosti prutů konstrukce**

Protože je konstrukce stožáru příhradová, vznikají v prutech pouze normálové síly. V mezním stavu únosnosti tedy posuzujeme pruty namáhané tahem a vzpěrným tlakem.

Vyvstává ovšem otázka, jaké budou kritické délky jednotlivých prutů. Z elementárních prutů se prutům konstrukce stožáru nejvíce blíží oboustranně kloubově uložené pruty. Podle ČSN EN 1993-3-1 [6], přílohy H byly vzpěrné délky totožné se systémovými délkami prutů. Systémová délka je délka prutu uvažovaná jako vzdálenost mezi jeho koncovými uzly. Při určování poměrné štíhlosti do výpočtu vstupuje součinitel  $K$ , který se volí podle tabulek ČSN EN 1993-3-1 [6] v příloze G.

V kapitole 8.1.1.1 je uvedeno podrobnější posouzení prutu nárožníku 1. dílce v nejnižším panelu konstrukce stožáru.

#### **8.1.1.1 Posouzení vybraného prutu v mezním stavu únosnosti**

Prut je navržen z kruhové trubky s vnějším průměrem 108,8 mm a tloušťkou 8,8 mm. Prut má systémovou délku 1,91 m a součinitel kritické délky  $\beta_{cr}=1,0$ . Výpočtem vychází maximální tlaková síla 393,53 kN a maximální tahová síla 378,19 kN.

##### vstupní data

$$L = 1905\text{mm}$$

$$\beta_{cr} = 1,0$$

$$A = 2,74 * 10^{-3}\text{m}^2; i_y = 35,2\text{mm}$$

##### výpočet součinitele vzpěru

$$L_{cr} = L\beta_{cr} = 1,91 * 1,0 = 1905\text{mm}$$



$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i_y} = \frac{1905}{35,2} = 54,1$$

$$\bar{\lambda} = K \frac{\lambda}{93,9 \sqrt{\frac{235}{f_y}}} = 1,0 * \frac{54,1}{93,9 * 1} = 0,576$$

křivka vzpěrnosti: pro válcované trubky  $a \rightarrow \alpha = 0,21$

$$\bar{\lambda} = 0,576 \rightarrow \chi = 0,899$$

posouzení prutu ve vzpěrném tlaku

$$N_{b,Rd} = \chi A \frac{f_y}{\gamma_{m,0}} = 0,899 * 2,74 * 10^{-3} * \frac{235 * 10^3}{1,0} = 578,70 kN$$

$$N_{b,Rd} = 578,70 kN \geq N_{ed}^- = 395,76 kN \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

posouzení prutu v tahu

$$N_{Rd} = A \frac{f_y}{\gamma_{m,0}} = 2,74 * 10^{-3} * \frac{235 * 10^3}{1,0} = 643,90 kN$$

$$N_{Rd} = 643,90 kN \geq N_{ed}^+ = 377,85 kN \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

### 8.1.1.2 Stručný přehled posouzení prutů v mezním stavu únosnosti

Aby zde nebyla uvedena jednotlivá posouzení pro všech 107 prutů konstrukce, byly sloučeny posouzení pro pruty se stejnými geometrickými parametry a ty pak byly vloženy do přehledné tabulky 8.1.

*tabulka 8.1 – posouzení prutů konstrukce*

| prut               | L [m] | $\beta_{cr}$ [-] | $\lambda$ [-] | $\chi_y$ [-] | $N_{Ed}^-$ [kN] | $N_{Ed}^+$ [kN] | $N_{b,Rd}$ [kN] | $N_{Rd}$ [kN] |
|--------------------|-------|------------------|---------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| nárožník 1. panel  | 1,91  | 1,0              | 54,1          | 0,899        | 395,76          | 377,85          | 578,70          | 643,90        |
| nárožník 2. panel  | 1,70  | 1,0              | 48,4          | 0,919        | 392,09          | 373,36          | 591,99          | 643,90        |
| nárožník 3. panel  | 1,55  | 1,0              | 44,1          | 0,933        | 389,21          | 370,58          | 600,94          | 643,90        |
| nárožník 4. panel  | 1,40  | 1,0              | 39,9          | 0,946        | 387,51          | 369,89          | 609,28          | 643,90        |
| nárožník 5. panel  | 1,24  | 1,0              | 35,1          | 0,960        | 386,62          | 371,05          | 617,88          | 643,90        |
| nárožník 6. panel  | 1,15  | 1,0              | 32,8          | 0,966        | 386,99          | 374,54          | 621,87          | 643,90        |
| nárožník 7. panel  | 1,06  | 1,0              | 30,0          | 0,973        | 388,45          | 380,33          | 626,45          | 643,90        |
| diagonála 1. panel | 2,69  | 1,0              | 185,7         | 0,228        | 10,11           | 10,13           | 24,77           | 108,81        |
| diagonála 2. panel | 2,42  | 1,0              | 167,1         | 0,276        | 9,24            | 9,22            | 30,02           | 108,81        |

*pokračování tabulka 8.1 – posouzení prutů konstrukce*

| prut                 | L [m] | $\beta_{cr}$ [-] | $\lambda$ [-] | $\chi_y$ [-] | $N_{Ed}^-$ [kN] | $N_{Ed}^+$ [kN] | $N_{b,Rd}$ [kN] | $N_{Rd}$ [kN] |
|----------------------|-------|------------------|---------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| diagonála 3. panel   | 2,20  | 1,0              | 151,9         | 0,327        | 8,34            | 8,48            | 35,58           | 108,81        |
| diagonála 4. panel   | 1,99  | 1,0              | 137,4         | 0,388        | 7,51            | 7,83            | 42,27           | 108,81        |
| diagonála 5. panel   | 1,79  | 1,0              | 123,6         | 0,461        | 8,38            | 8,61            | 50,20           | 108,81        |
| diagonála 6. panel   | 1,64  | 1,0              | 112,8         | 0,529        | 10,62           | 10,91           | 57,56           | 108,81        |
| diagonála 7. panel   | 1,49  | 1,0              | 102,6         | 0,601        | 13,10           | 13,31           | 65,38           | 108,81        |
| horizontála 1. panel | 1,81  | 1,0              | 124,8         | 0,454        | 1,38            | 0,47            | 49,42           | 108,81        |
| horizontála 2. panel | 1,64  | 1,0              | 113,1         | 0,527        | 1,36            | 1,36            | 57,36           | 108,81        |
| horizontála 3. panel | 1,49  | 1,0              | 148,5         | 0,340        | 1,28            | 0,44            | 25,49           | 74,97         |
| horizontála 4. panel | 1,35  | 1,0              | 134,5         | 0,402        | 1,20            | 0,41            | 30,17           | 74,97         |
| horizontála 5. panel | 1,22  | 1,0              | 122,0         | 0,471        | 1,12            | 0,39            | 35,29           | 74,97         |
| horizontála 6. panel | 1,11  | 1,0              | 110,5         | 0,545        | 1,06            | 0,37            | 40,84           | 74,97         |
| horizontála 7. panel | 1,00  | 1,0              | 100,0         | 0,620        | 19,16           | 19,57           | 46,49           | 74,97         |
| nárožník 2. dílec    | 1,00  | 1,0              | 30,4          | 0,972        | 377,67          | 360,89          | 586,97          | 603,95        |
| diagonála 2. dílec   | 1,41  | 1,0              | 97,5          | 0,639        | 36,09           | 36,32           | 69,48           | 108,81        |
| horizontála 2. dílec | 1,00  | 1,0              | 100,0         | 0,620        | 0,98            | 0,36            | 46,49           | 74,97         |
| nárožník 3. dílec    | 1,00  | 1,0              | 34,4          | 0,962        | 229,81          | 213,88          | 411,25          | 427,70        |
| diagonála 3. dílec   | 1,41  | 1,0              | 97,5          | 0,639        | 30,52           | 30,79           | 69,48           | 108,81        |
| horizontála 3. dílec | 1,00  | 1,0              | 100,0         | 0,620        | 4,11            | 3,21            | 46,49           | 74,97         |
| nárožník 4. dílec    | 1,00  | 1,0              | 39,2          | 0,948        | 104,82          | 104,72          | 201,86          | 212,91        |
| diagonála 4. dílec   | 1,41  | 1,0              | 141,4         | 0,370        | 20,70           | 20,92           | 27,73           | 74,97         |
| horizontála 4. dílec | 1,00  | 1,0              | 100,0         | 0,620        | 2,25            | 1,21            | 46,49           | 74,97         |
| horizontála 4. dílec | 1,00  | 1,0              | 39,2          | 0,948        | 1,88            | 1,90            | 201,86          | 212,91        |

### **8.1.2 Mezní stav únosnosti styčnicků konstrukce**

Profily výplňových prutů příhradové konstrukce budou konců po délce naříznuty, nasunuty výřezy na styčnickový plech a poté přivařeny čtyřmi koutovými svary. Svary posoudíme na celkové 3D namáhání.

To platí pro většinu výplňových prutů, avšak ne pro 12 diagonál, které mají svůj začátek a konec v jiném montážním dílu. Místo styčnickového plechu bude do výřezu nasunut plech se dvěma otvory pro šrouby. Pro tyto pruty budou speciálně upraveny styčnickové plechy především svými většími rozměry, aby byly dodrženy doporučené minimální vzdálenosti mezi šrouby. Šrouby posuzujeme na stříh a otláčení.

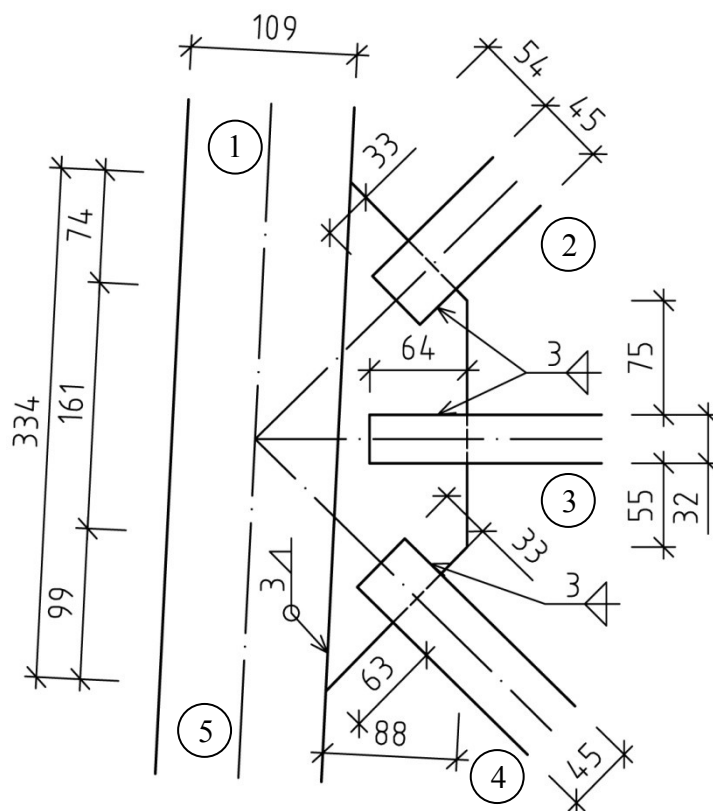
Styčnickový plech bude mít nejmenší potřebné rozměry a bude k průběžnému nárožníku z boku přivařen dvěma koutovými svary tak, že nebude procházet stěnou trubky nárožníku.

Svary posuzujeme na 3D namáhání a nesmíme zapomenout na prolomení stěny trubky. V tomto ohledu nemají eurokódy [7] normativní podklady pro posouzení. Na praxi mi byla doporučena norma ČSN 73 1403 [2] o navrhování trubek v ocelových konstrukcích.

### 8.1.2.1 K styčník

V této části kapitoly je uvedeno posouzení pouze vybraného styčníku tvaru “K“, který se nachází v horní části 1. panelu konstrukce stožáru. Posuzovaný styčník je místem připojení 2 diagonál a 1 horizontály k průběžnému nárožníku přes styčníkový plech. Celý přípoj je svařovaný.

obrázek 8.1 – detail K styčníku v měřítku 1:5



#### vstupní data

ocel: S235  $\Rightarrow f_y = 235 \text{ MPa}; f_u = 360 \text{ MPa}; \beta_w = 0,8 \text{ MPa}$

$d_{1,5} = 108,8 \text{ mm}; t_{1,5} = 8,8 \text{ mm}; N_{1,ed} = 378,74 \text{ kN}; \alpha_1 = 87,2^\circ$

$d_2 = 44,5 \text{ mm}; t_2 = 3,6 \text{ mm}; N_{2,ed} = -13,10 \text{ kN}; \alpha_2 = 44,5^\circ$

$d_3 = 44,5 \text{ mm}; t_3 = 3,6 \text{ mm}; N_{3,ed} = -0,03 \text{ kN}; \alpha_3 = 0,0^\circ$

$$d_4 = 44,5\text{mm}; t_4 = 3,6\text{mm}; N_{4,ed} = 10,91\text{kN}; \alpha_4 = -44,5^\circ$$

$$N_{5,ed} = 361,37\text{kN}$$

síly působící na svary přípoje styčnickového plechu k nárožníku

$$H = \sum_2^4 N_{ed,i} \cos \alpha_i = -13,10 * \cos 44,5^\circ - 0,03 * \cos 0,0^\circ + 10,91 * \cos -44,5^\circ$$

$$V = \sum_2^4 N_{ed,i} \sin \alpha_i = -13,10 * \sin 44,5^\circ - 0,03 * \sin 0,0^\circ + 10,91 * \sin -44,5^\circ$$

$$H = -1,59\text{kN}; V = -16,83\text{kN}$$

$$N_{ed} = H \cos(\alpha_1 - 90^\circ) + V \sin(\alpha_1 - 90^\circ) = -1,59 * \cos -2,8^\circ - 16,83 * \sin -2,8^\circ$$

$$V_{ed} = -H \sin(\alpha_1 - 90^\circ) + V \cos(\alpha_1 - 90^\circ) = 1,59 * \sin -2,8^\circ + 16,83 * \cos -2,8^\circ$$

$$N_{ed} = -0,77\text{kN}; V_{ed} = -16,89\text{kN}$$

posouzení únosnosti prutů ve styčnicku s uvážením oslabených ploch průřezů

$$A_{1,5,net} = A_{1,5} = 2,76 * 10^{-3}\text{m}^2$$

$$A_{2,net} = 4,19 * 10^{-4}\text{m}^2; A_{2,p} = 3,18 * 10^{-4}\text{m}^2$$

$$A_{3,net} = 2,76 * 10^{-4}\text{m}^2; A_{3,p} = 2,42 * 10^{-4}\text{m}^2$$

$$A_{4,net} = 4,19 * 10^{-4}\text{m}^2; A_{4,p} = 3,18 * 10^{-4}\text{m}^2$$

$$N_{Rd} = \min\left(\frac{A_p f_y}{\gamma_{m,0}}; \frac{0,9 A_{net} f_y}{\gamma_{m,0}}\right)$$

$$N_{1,5,Rd} = 2,76 * 10^{-3} * 235 * 10^3 / 1,0 = 649,68\text{kN} \geq N_{5,ed} = 378,74\text{kN} \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

$$N_{3,Rd} = 2,76 * 10^{-4} * 235 * 10^3 / 1,0 = 56,8\text{kN} \geq N_{4,ed} = 0,03\text{kN} \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

$$N_{2,4,Rd} = 3,18 * 10^{-4} * 235 * 10^3 / 1,0 = 74,71\text{kN} \geq N_{4,ed} = 13,10\text{kN} \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

posouzení na prolomení pásové trubky

$$b_{ec} = 108,8\text{mm}; t_{ec} = 8,8\text{mm}$$

$$|N_{3,ed}| \leq \max(|N_{2,ed}|, |N_{4,ed}|) \rightarrow b_{ed} = 44,5\text{mm}$$

$$\frac{b_{ed}}{b_{ec}} \leq 0,9 \Rightarrow \chi = 52$$

$$\alpha = 1,50$$

$$N_{Rd} = \chi \alpha \frac{f_y}{\gamma_{m,0}} t_c^{1,5} \left(\frac{b_{ed}}{b_{ec}}\right)^2 = 52 * 1,50 * \frac{235}{1,0} * 8,8^{1,5} * \left(\frac{44,5}{108,8}\right)^2 * 10^{-3}$$

$$N_{Rd} = 80,05\text{kN} \geq N_{ed} = 0,77\text{kN} \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

posouzení svarů přípoje horní diagonály ke styčnickovému plechu

$$N_{2,ed} = 13,10kN$$

$$l_{we} = 30mm; a_{we} = 3mm; n_{we} = 4$$

$$A = n_{we}a_{we}l_{we} = 4 * 3 * 30 = 3,60 * 10^{-4}m^2$$

$$\tau_{0,\perp} = \sigma_{0,\perp} = 0MPa$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{N_{ed}}{A} = \frac{13,10}{3,60 * 10^{-4}} * 10^{-3} = 36,39MPa$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{0,\perp}^2 + 3\tau_{\parallel}^2 + 3\sigma_{0,\perp}^2} = 36,39 * \sqrt{3} = 63,03MPa$$

$$\frac{f_u}{\gamma_{m,2}} = \frac{360}{1,25} = 288MPa \geq \sigma_{0,\perp} = 0MPa \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{m,2}} = \frac{360}{0,8 * 1,25} = 360MPa \geq \sigma = 63,03MPa \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

posouzení svarů přípoje horizontály ke styčnickovému plechu

$$N_{3,ed} = 0,03kN$$

$$l_{we} = 58mm; a_{we} = 3mm; n_{we} = 4$$

$$A = n_{we}a_{we}l_{we} = 4 * 3 * 58 = 6,96 * 10^{-4}m^2$$

$$\tau_{0,\perp} = \sigma_{0,\perp} = 0MPa$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{N_{ed}}{A} = \frac{0,03}{6,96 * 10^{-4}} * 10^{-3} = 0,04MPa$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{0,\perp}^2 + 3\tau_{\parallel}^2 + 3\sigma_{0,\perp}^2} = 0,04 * \sqrt{3} = 0,07MPa$$

$$\frac{f_u}{\gamma_{m,2}} = \frac{360}{1,25} = 288MPa \geq \sigma_{0,\perp} = 0MPa \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{m,2}} = \frac{360}{0,8 * 1,25} = 360MPa \geq \sigma = 0,07MPa \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

posouzení svarů přípoje dolní diagonály ke styčnickovému plechu

$$N_{4,ed} = 10,91kN$$

$$l_{we} = 30mm; a_{we} = 3mm; n_{we} = 4$$

$$A = n_{we}a_{we}l_{we} = 4 * 3 * 30 = 3,60 * 10^{-4}m^2$$

$$\tau_{0,\perp} = \sigma_{0,\perp} = 0MPa$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{N_{ed}}{A} = \frac{10,91}{3,60 * 10^{-4}} * 10^{-3} = 30,31MPa$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{0,\perp}^2 + 3\tau_{\parallel}^2 + 3\sigma_{0,\perp}^2} = 30,31 * \sqrt{3} = 52,49MPa$$

$$\frac{f_u}{\gamma_{m,2}} = \frac{360}{1,25} = 288MPa \geq \sigma_{0,\perp} = 0MPa \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{m,2}} = \frac{360}{0,8 * 1,25} = 360MPa \geq \sigma = 52,49MPa \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

posouzení svarů přípoje styčnickového plechu k nárožníku

$$N_{ed} = -0,77kN; V_{ed} = -16,89kN$$

$$l_{we} = 328mm; a_{we} = 3mm; n_{we} = 2$$

$$A = n_{we}a_{we}l_{we} = 2 * 3 * 328 = 1,97 * 10^{-3}m^2$$

$$\tau_{0,\perp} = \sigma_{0,\perp} = \frac{|N_{ed}| \sqrt{2}}{A} \frac{1}{2} = \frac{0,77}{1,97 * 10^{-3}} * 10^{-3} * 0,707 = 0,27MPa$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{N_{ed}}{A} = \frac{|-16,89|}{1,97 * 10^{-3}} * 10^{-3} = 8,58MPa$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{0,\perp}^2 + 3\tau_{\parallel}^2 + 3\sigma_{0,\perp}^2} = \sqrt{0,27^2 + 3 * 0,27^2 + 3 * 8,58^2} = 14,87MPa$$

$$\frac{f_u}{\gamma_{m,2}} = \frac{360}{1,25} = 288MPa \geq \sigma_{0,\perp} = 0,27MPa \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

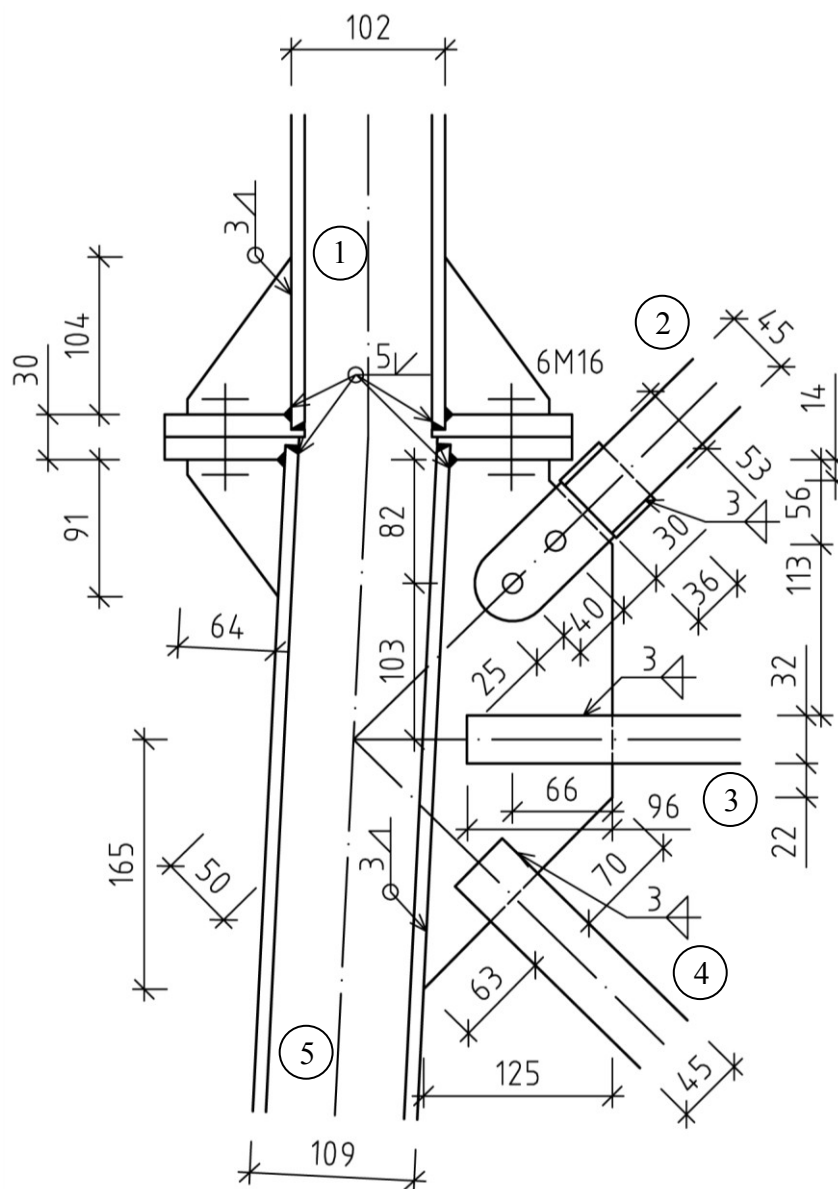
$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{m,2}} = \frac{360}{0,8 * 1,25} = 360MPa \geq \sigma = 14,87MPa \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

Posouzení všech K styčníků odlišujících se geometrií styčnicku nebo připojených prutů je uvedeno v příloze č. 4, v části D.1.

**8.1.2.2 Upravený K styčník pro montážní šroubový spoj diagonály**

V této části kapitoly je uvedeno posouzení styčníku tvaru “K“, který se od většiny K styčníků liší v přípoji horní diagonály. Vybraný styčník se nachází v horní části mezi 1. a 2. montážním dílcem konstrukce stožáru. Posuzovaný styčník je místem připojení 2 diagonál a 1 horizontály k průběžnému nárožníku přes styčníkový plech. Přípoj je svařovaný, kromě šroubového uchycení horní diagonály na styčníkový plech. Plech tohoto přípoje je zasunut do výřezu v trubce a následně je k ní přivařen. Spojení plechu na konci horní diagonály se styčníkovým plechem dvěma šrouby proběhne až při montáži konstrukce na staveništi.

obrázek 8.2 – detail upraveného K styčníku v měřítku 1:5



vstupní data

ocel: S235  $\Rightarrow f_y = 235 \text{ MPa}; f_u = 360 \text{ MPa}; \beta_w = 0,8 \text{ MPa}$

$$d_{1,5} = 108,8 \text{ mm}; t_{1,5} = 8,8 \text{ mm}; N_{1,ed} = -357,29 \text{ kN}; \alpha_1 = 87,2^\circ$$

$$d_2 = 44,5 \text{ mm}; t_2 = 3,6 \text{ mm}; N_{2,ed} = -36,09 \text{ kN}; \alpha_2 = 45,0^\circ$$

$$d_3 = 31,8 \text{ mm}; t_3 = 3,6 \text{ mm}; N_{3,ed} = 1,92 \text{ kN}; \alpha_3 = 0,0^\circ$$

$$d_4 = 44,5 \text{ mm}; t_4 = 3,6 \text{ mm}; N_{4,ed} = 5,97 \text{ kN}; \alpha_4 = -44,5^\circ$$

$$N_{5,ed} = -388,45 \text{ kN}$$

síly působící na svary přípoje styčnickového plechu k nárožníku

$$H = \sum_2^4 N_{ed,i} \cos \alpha_i = -36,09 * \cos 45,0^\circ + 1,92 * \cos 0,0^\circ + 5,97 * \cos -44,5^\circ$$

$$V = \sum_2^4 N_{ed,i} \sin \alpha_i = -36,09 * \sin 45,0^\circ + 1,92 * \sin 0,0^\circ + 5,97 * \sin -44,5^\circ$$

$$H = -19,34 \text{ kN}; V = -29,70 \text{ kN}$$

$$N_{ed} = H \cos(\alpha_1 - 90^\circ) + V \sin(\alpha_1 - 90^\circ) = -19,34 * \cos -2,8^\circ - 29,70 * \sin -2,8^\circ$$

$$V_{ed} = -H \sin(\alpha_1 - 90^\circ) + V \cos(\alpha_1 - 90^\circ) = 19,34 * \sin -2,8^\circ - 29,70 * \cos -2,8^\circ$$

$$N_{ed} = -17,86 \text{ kN}; V_{ed} = -30,62 \text{ kN}$$

posouzení únosnosti prutů ve styčnicku s uvážením oslabených ploch průřezů

$$A_{1,5,net} = A_{1,5} = 2,76 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_{2,net} = 4,19 * 10^{-4} \text{ m}^2; A_{2,p} = 3,00 * 10^{-4} \text{ m}^2; A_{2,p,net} = 2,22 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{3,net} = 2,76 * 10^{-4} \text{ m}^2; A_{3,p} = 2,42 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{4,net} = 4,19 * 10^{-4} \text{ m}^2; A_{4,p} = 3,18 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$N_{Rd} = \min \left( \frac{A_p f_y}{\gamma_{m,0}}; \frac{0,9 A_{net} f_y}{\gamma_{m,0}} \right)$$

$$N_{1,5,Rd} = 2,76 * 10^{-3} * 235 * 10^3 / 1,0 = 649,68 \text{ kN} \geq N_{5,ed} = 388,45 \text{ kN} \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

$$N_{3,Rd} = 2,42 * 10^{-4} * 235 * 10^3 / 1,0 = 56,80 \text{ kN} \geq N_{3,ed} = 1,92 \text{ kN} \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

$$N_{4,Rd} = 3,18 * 10^{-4} * 235 * 10^3 / 1,0 = 74,71 \text{ kN} \geq N_{4,ed} = 5,97 \text{ kN} \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

posouzení horní diagonály bude provedeno až po výpočtu maximální únosnosti svaru na plechu umožňujícího šroubový přípoj ke konci trubky.



posouzení na prolomení pásové trubky

$$b_{ec} = 108,8\text{mm}; t_{ec} = 8,8\text{mm}$$

$$|N_{3,ed}| \leq \max(|N_{2,ed}|, |N_{4,ed}|) \rightarrow b_{ed} = 44,5\text{mm}$$

$$\frac{b_{ed}}{b_{ec}} \leq 0,9 \Rightarrow \chi = 52$$

$$\alpha = 1,50$$

$$N_{Rd} = \chi \alpha \frac{f_y}{\gamma_{m,0}} t_c^{1,5} \left( \frac{b_{ed}}{b_{ec}} \right)^2 = 52 * 1,50 * \frac{235}{1,0} * 8,8^{1,5} * \left( \frac{44,5}{108,8} \right)^2 * 10^{-3}$$

$$N_{Rd} = 80,05\text{kN} \geq N_{ed} = 17,86\text{kN} \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

posouzení šroubů přípoje horní diagonály ke styčnickovému plechu

$$\text{šrouby: } 8,8; f_{yb} = 640\text{MPa}; f_{ub} = 800\text{MPa}; n = 2; \alpha_v = 0,6$$

$$d = 12\text{mm} \Rightarrow d_0 = 13\text{mm}; A = 84,3\text{mm}^2; p = 40\text{mm}; e_{min} = 25\text{mm}$$

$$k_1 = \min\left(2,5; 2,8 \frac{e_{min}}{d_0} - 1,7\right) = \min(2,5; 7,08) = 2,50$$

$$\alpha_b = \min\left(1,0; \frac{f_{ub}}{f_u}; \frac{e_{min}}{3d_0}; \frac{p}{3d_0} - \frac{1}{4}\right) = \min(1,0; 2,22; 0,64; 0,78) = 0,64$$

$$F_{V,Rd,ch} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{m,2}} = \frac{0,6 * 800 * 84,3 * 10^{-3}}{1,25} = 32,37\text{kN}$$

$$F_{B,Rd,ch} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t_p}{\gamma_{m,2}} = \frac{2,50 * 0,64 * 360 * 12 * 6 * 10^{-3}}{1,25} = 33,23\text{kN}$$

$$F_{Rd} = \min(F_{V,Rd,ch}; F_{B,Rd,ch}) n = 2 * \min(32,37; 33,23) = 64,74\text{kN}$$

$$N_{Rd} = F_{Rd} = 64,74\text{kN} \geq N_{2,ed} = 36,09\text{kN} \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

posouzení svarů přípoje horní diagonály ke koncovému plechu

$$N_{2,ed} = 36,09\text{kN}$$

$$l_{we} = 30\text{mm}; a_{we} = 3\text{mm}; n_{we} = 4$$

$$A = n_{we} a_{we} l_{we} = 4 * 3 * 30 = 3,60 * 10^{-4}\text{m}^2$$

$$\tau_{0,\perp} = \sigma_{0,\perp} = 0\text{MPa}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{N_{ed}}{A} = \frac{36,09}{3,60 * 10^{-4}} * 10^{-3} = 100,25\text{MPa}$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{0,\perp}^2 + 3\tau_{\parallel}^2 + 3\sigma_{0,\perp}^2} = 100,25 * \sqrt{3} = 173,64 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_u}{\gamma_{m,2}} = \frac{360}{1,25} = 288 \text{ MPa} \geq \sigma_{0,\perp} = 0 \text{ MPa} \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{m,2}} = \frac{360}{0,8 * 1,25} = 360 \text{ MPa} \geq \sigma = 173,64 \text{ MPa} \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

$$F_{2,Rd} = \frac{f_u / (\beta_w \gamma_{m,2})}{\sigma} N_{2,ed} = \frac{360}{173,64} * 36,09 = 74,82 \text{ kN}$$

$$N_{2,Rd} = \min \left[ F_{2,Rd}; \min \left( \frac{A_p f_y}{\gamma_{m,0}}; \frac{0,9 A_{net} f_y}{\gamma_{m,0}} \right) \right] = \min(74,80; 57,54) = 57,54 \text{ kN}$$

$$N_{2,Rd} = 57,54 \text{ kN} \geq N_{2,ed} = 36,09 \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

posouzení svarů přípoje horizontály ke styčnickovému plechu

$$N_{3,ed} = 1,92 \text{ kN}$$

$$l_{we} = 90 \text{ mm}; a_{we} = 3 \text{ mm}; n_{we} = 4$$

$$A = n_{we} a_{we} l_{we} = 4 * 3 * 30 = 1,08 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\tau_{0,\perp} = \sigma_{0,\perp} = 0 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{N_{ed}}{A} = \frac{1,92}{1,08 * 10^{-3}} * 10^{-3} = 1,78 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{0,\perp}^2 + 3\tau_{\parallel}^2 + 3\sigma_{0,\perp}^2} = 1,78 * \sqrt{3} = 3,08 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_u}{\gamma_{m,2}} = \frac{360}{1,25} = 288 \text{ MPa} \geq \sigma_{0,\perp} = 0 \text{ MPa} \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{m,2}} = \frac{360}{0,8 * 1,25} = 360 \text{ MPa} \geq \sigma = 3,08 \text{ MPa} \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

posouzení svarů přípoje dolní diagonály ke styčnickovému plechu

$$N_{4,ed} = 5,97 \text{ kN}$$

$$l_{we} = 30 \text{ mm}; a_{we} = 3 \text{ mm}; n_{we} = 4$$

$$A = n_{we} a_{we} l_{we} = 4 * 3 * 30 = 3,60 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\tau_{0,\perp} = \sigma_{0,\perp} = 0 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{N_{ed}}{A} = \frac{5,97}{3,60 * 10^{-4}} * 10^{-3} = 16,58 MPa$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{0,\perp}^2 + 3\tau_{\parallel}^2 + 3\sigma_{0,\perp}^2} = 16,58 * \sqrt{3} = 28,72 MPa$$

$$\frac{f_u}{\gamma_{m,2}} = \frac{360}{1,25} = 288 MPa \geq \sigma_{0,\perp} = 0 MPa \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{m,2}} = \frac{360}{0,8 * 1,25} = 360 MPa \geq \sigma = 28,72 MPa \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

posouzení svarů přípoje styčnickového plechu k nárožníku

$$N_{ed} = -17,86 kN; V_{ed} = -30,62 kN$$

$$l_{we} = 345 mm; a_{we} = 3 mm; n_{we} = 2$$

$$A = n_{we} a_{we} l_{we} = 2 * 3 * 350 = 2,07 * 10^{-3} m^2$$

$$\tau_{0,\perp} = \sigma_{0,\perp} = \frac{|N_{ed}| \sqrt{2}}{A} \frac{1}{2} = \frac{17,86}{2,07 * 10^{-3}} * 10^{-3} * 0,707 = 6,10 MPa$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{N_{ed}}{A} = \frac{30,62}{2,10 * 10^{-3}} * 10^{-3} = 14,79 MPa$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{0,\perp}^2 + 3\tau_{\parallel}^2 + 3\sigma_{0,\perp}^2} = \sqrt{6,10^2 + 3 * 6,10^2 + 3 * 14,79^2} = 28,38 MPa$$

$$\frac{f_u}{\gamma_{m,2}} = \frac{360}{1,25} = 288 MPa \geq \sigma_{0,\perp} = 6,10 MPa \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

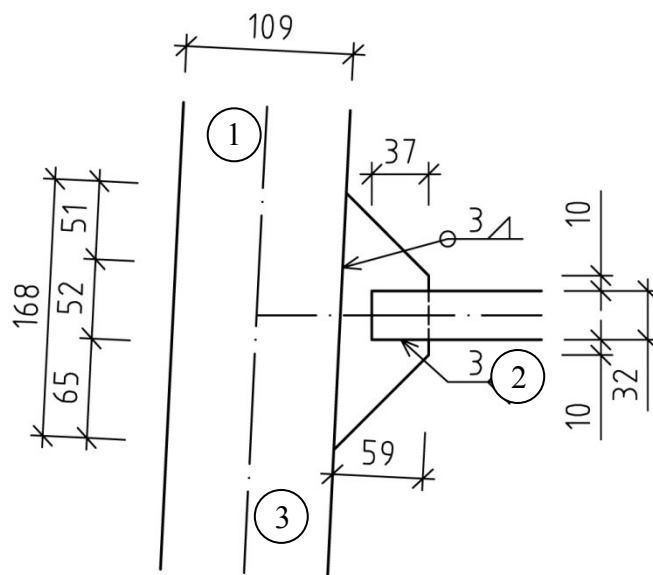
$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{m,2}} = \frac{360}{0,8 * 1,25} = 360 MPa \geq \sigma = 28,38 MPa \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

Posouzení ostatních K styčníků upravených pro spoj montážních dílců odlišujících se geometrií styčnicku nebo připojených prutů je uvedeno v příloze č. 4, v části D.1 s ostatními K styčnickými.

### 8.1.2.3 T styčník

T styčník se od K styčnicku liší pouze v absenci horní a spodní diagonály ve styčnicku. Horizontálu označíme vstupujícím prutem č. 2 a procházející nárožník č. 1 a 3. V této části kapitoly je posouzení vybraného styčnicku tvaru “T” na 1. montážním dílci.

obrázek 8.3 – detail T styčnicku v měřítku 1:5



#### vstupní data

ocel: S235  $\Rightarrow f_y = 235 \text{ MPa}; f_u = 360 \text{ MPa}; \beta_w = 0,8 \text{ MPa}$

$$d_{1,3} = 108,8 \text{ mm}; t_{1,5} = 8,8 \text{ mm}; N_{1,ed} = 357,82 \text{ kN}; \alpha_1 = 87,2^\circ$$

$$d_2 = 31,8 \text{ mm}; t_2 = 3,6 \text{ mm}; N_{2,ed} = 19,57 \text{ kN}; \alpha_2 = 0,0^\circ$$

$$N_{3,ed} = 380,33 \text{ kN}$$

#### síly působící na svary přípoje styčnickového plechu k nárožníku

$$H = N_{2,ed} \cos \alpha_2 = 19,57 * \cos 0,0^\circ = 19,57 \text{ kN}$$

$$V = N_{2,ed} \sin \alpha_2 = 19,57 * \sin 0,0^\circ = 0 \text{ kN}$$

$$N_{ed} = H \cos(\alpha_1 - 90^\circ) + V \sin(\alpha_1 - 90^\circ) = 19,57 * \cos -2,8^\circ + 0 * \sin -2,8^\circ$$

$$V_{ed} = -H \sin(\alpha_1 - 90^\circ) + V \cos(\alpha_1 - 90^\circ) = -19,57 * \sin -2,8^\circ + 0 * \cos -2,8^\circ$$

$$N_{ed} = 19,55 \text{ kN}; V_{ed} = 0,96 \text{ kN}$$

posouzení únosnosti prutů ve styčnicku s uvažáním oslabených ploch průřezů

$$A_{1,5,net} = A_{1,5} = 2,76 * 10^{-3} m^2$$

$$A_{3,net} = 2,76 * 10^{-4} m^2; A_{3,p} = 2,42 * 10^{-4} m^2$$

$$N_{Rd} = \min \left( \frac{A_p f_y}{\gamma_{m,0}}; \frac{0,9 A_{net} f_y}{\gamma_{m,0}} \right)$$

$$N_{1,3,Rd} = 2,76 * 10^{-3} * 235 * 10^3 / 1,0 = 649,68 kN \geq N_{5,ed} = 380,33 kN \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

$$N_{2,Rd} = 2,42 * 10^{-4} * 235 * 10^3 / 1,0 = 56,80 kN \geq N_{3,ed} = 19,57 kN \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

posouzení na prolomení pásové trubky

$$b_{ec} = 108,8 mm; t_{ec} = 8,8 mm$$

$$|N_{3,ed}| \leq \max(|N_{2,ed}|, |N_{4,ed}|) \rightarrow b_{ed} = 31,8 mm$$

$$\frac{b_{ed}}{b_{ec}} \leq 0,9 \Rightarrow \chi = 52$$

$$\alpha = 1,50$$

$$N_{Rd} = \chi \alpha \frac{f_y}{\gamma_{m,0}} t_c^{1,5} \left( \frac{b_{ed}}{b_{ec}} \right)^2 = 52 * 1,50 * \frac{235}{1,0} * 8,8^{1,5} * \left( \frac{31,8}{108,8} \right)^2 * 10^{-3}$$

$$N_{Rd} = 40,88 kN \geq N_{ed} = 19,55 kN \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

posouzení svarů přípoje horizontály ke styčnickovému plechu

$$N_{3,ed} = 19,57 kN$$

$$l_{we} = 30 mm; a_{we} = 3 mm; n_{we} = 4$$

$$A = n_{we} a_{we} l_{we} = 4 * 3 * 30 = 3,60 * 10^{-4} m^2$$

$$\tau_{0,\perp} = \sigma_{0,\perp} = 0 MPa$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{N_{ed}}{A} = \frac{19,57}{3,60 * 10^{-4}} * 10^{-3} = 54,36 MPa$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{0,\perp}^2 + 3\tau_{\parallel}^2 + 3\sigma_{0,\perp}^2} = 54,36 * \sqrt{3} = 94,16 MPa$$

$$\frac{f_u}{\gamma_{m,2}} = \frac{360}{1,25} = 288 MPa \geq \sigma_{0,\perp} = 0 MPa \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{m,2}} = \frac{360}{0,8 * 1,25} = 360 MPa \geq \sigma = 94,16 MPa \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

posouzení svarů přípoje styčnickového plechu k nárožníku

$$N_{ed} = 19,55kN; V_{ed} = 0,96kN$$

$$l_{we} = 162mm; a_{we} = 3mm; n_{we} = 2$$

$$A = n_{we}a_{we}l_{we} = 2 * 3 * 162 = 9,72 * 10^{-4}m^2$$

$$\tau_{0,\perp} = \sigma_{0,\perp} = \frac{|N_{ed}| \sqrt{2}}{A} \frac{1}{2} = \frac{19,57}{9,72 * 10^{-4}} * 10^{-3} * 0,707 = 14,22MPa$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{N_{ed}}{A} = \frac{0,96}{2,10 * 10^{-3}} * 10^{-3} = 0,99MPa$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{0,\perp}^2 + 3\tau_{\parallel}^2 + 3\sigma_{0,\perp}^2} = \sqrt{14,22^2 + 3 * 14,23^2 + 3 * 0,99^2} = 28,49MPa$$

$$\frac{f_u}{\gamma_{m,2}} = \frac{360}{1,25} = 288MPa \geq \sigma_{0,\perp} = 14,22MPa \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

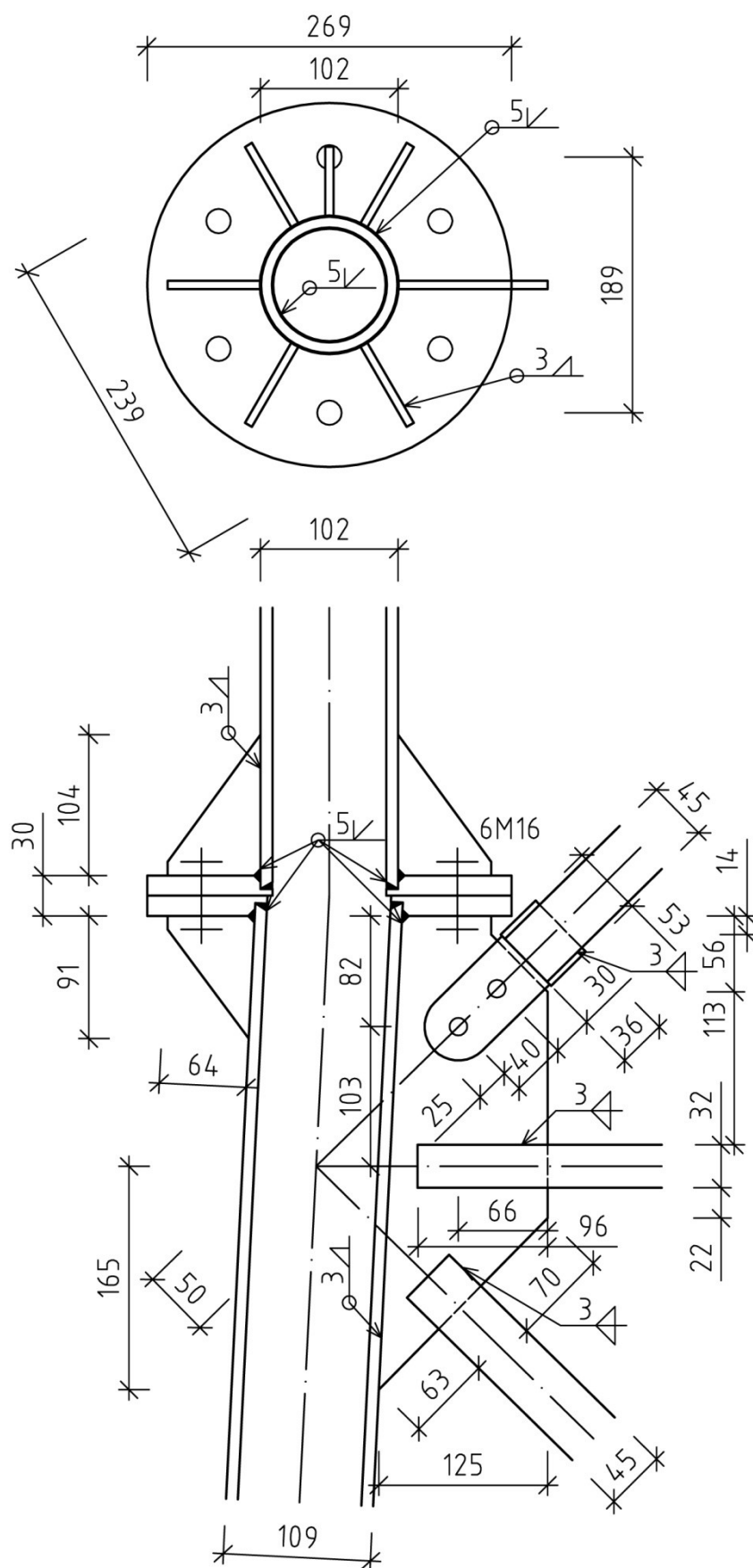
$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{m,2}} = \frac{360}{0,8 * 1,25} = 360MPa \geq \sigma = 28,49MPa \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

Výše uvedené posouzení je pro T styčníky v horní části 1. montážního dílce. Posouzení ostatních T styčnicků je uvedeno v příloze č. 4, v části D.2.

#### **8.1.2.4 Spoj montážních dílců na nárožnících**

U těchto spojů na únosnost posuzujeme především šrouby namáhané tahem i s uvážením vlivu páčení šroubů. Součástí tohoto posouzení je i posouzení příruby na koncích trubek. Příruby mají navrženy výztuhy, a to vždy 1 výztuha mezi 2 šrouby. Jedna z výztuh je součástí styčnickového plechu K styčníku upraveného pro spoj montážních dílců. Pro vzorový výpočet byl vybrán spoj 1. a 2. montážního dílce.

obrázek 8.4 – detail šroubového spoje mezi montážními dílci v měřítku 1:5



vstupní data

$$\text{ocel: } S235 \Rightarrow f_y = 235 \text{ MPa}; f_u = 360 \text{ MPa}; \beta_w = 0,8 \text{ MPa}$$

$$d_h = 101,6 \text{ mm}; t_h = 8,8 \text{ mm}; A_h = 2,57 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$d_d = 108,8 \text{ mm}; t_d = 8,8 \text{ mm}; A_d = 2,76 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$N_{ed} = 360,89 \text{ kN}$$

$$e = 40 \text{ mm}; m_{0,d} = 40 \text{ mm}; t_p = 25 \text{ mm}; t_v = 6 \text{ mm}$$

posouzení prutů

$$N_{Rd} = \min(A_h; A_d) \frac{f_y}{\gamma_{m,0}} = \min(2,57 * 10^{-3}; 2,76 * 10^{-3}) \frac{235 * 10^3}{1,0} = 602,90 \text{ kN}$$

$$N_{Rd} = 602,90 \text{ kN} \geq N_{ed} = 360,89 \text{ kN} \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

posouzení svarového přípoje čelní desky k profilu prutu

$$a_{we} = 6 \text{ mm}$$

$$l_{we} = \pi \min(d_h; d_d) = \pi * 101,6 = 319 \text{ mm}$$

$$A_{we} = 2a_{we}l_{we} = 2 * 6 * 319 * 10^{-6} = 3,19 * 10^{-3}$$

$$\sigma_{Rd} = \frac{f_u}{\gamma_{m,2}} = \frac{360}{1,25} = 288 \text{ MPa}$$

$$N_{Rd} = \sigma_{Rd} A_{we} = 288 * 3,19 = 650,01 \text{ kN} \geq N_{ed} = 360,89 \text{ kN} \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

posouzení šroubů a čelní desky

$$\text{šrouby: } 8,8; f_{yb} = 640 \text{ MPa}; f_{ub} = 800 \text{ MPa}; s = 6; \alpha_v = 0,6; k_2 = 0,9$$

$$d = 16 \text{ mm} \Rightarrow d_0 = 18 \text{ mm}; A = 157 \text{ mm}^2; e_{min,dop} = 30 \text{ mm}; d_m = 25,85 \text{ mm}$$

$$p = 2 * \left[ m_{0,d} + \frac{\max(d_h; d_d)}{2} \right] \sin\left(\frac{n}{360}/2\right) = 2 * \left( 40 + \frac{108,8}{2} \right) * \sin 30^\circ = 94,4 \text{ mm}$$

$$e_v = \frac{p - t_v}{2} = \frac{94,4 - 6}{2} = 44,20 \text{ mm}$$

$$m = \max(m_{0,d}; e_v) - a_{we} \sqrt{2} = 44,2 - 6 * 1,42 = 35,7 \text{ mm}$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{m}{m + e} = \frac{35,7}{35,7 + 40} = 0,47 \rightarrow \alpha = 6,07$$

$$n = \min(e_{min}; 1,25m) = \min(40; 1,25 * 35,7) = 40 \text{ mm}$$

$$F_{t,Rd,ch} = \frac{k_2 f_{ub} A}{\gamma_{m,2}} = \frac{0,9 * 800 * 157 * 10^{-3}}{1,25} = 90,43 \text{ kN}$$



$$B_{p,Rd,ch} = \frac{0,6\pi d_m t_p f_u}{\gamma_{m,2}} = \frac{0,6 * \pi * 25,85 * 10 * 360 * 10^{-3}}{1,25} = 140,33kN$$

$$l_{eff,cp} = \pi m + p = \pi * 35,7 + 94,4 = 206,6mm$$

$$l_{eff,nc} = 0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e)$$

$$l_{eff,nc} = 0,5 * 94,4 + 6,07 * 35,7 - (2 * 35,7 + 0,625 * 40) = 167,7mm$$

$$l_{eff,nc} \leq l_{eff,cp} \rightarrow l_{eff,1} = l_{eff,nc} = 167,7mm$$

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 167,7mm$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{\sum l_{eff,1} t_p^2 f_y / \gamma_{m,0}}{4} = \frac{3 * 167,7 * 25^2 * 235 / 1,0}{4} * 10^{-6} = 6,65kNm$$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{\sum l_{eff,2} t_p^2 f_y / \gamma_{m,0}}{4} = \frac{3 * 167,7 * 25^2 * 235 / 1,0}{4} * 10^{-6} = 6,65kNm$$

$$N_{1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 6,65}{35,7 * 10^{-3}} = 744,84kN$$

$$N_{2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 6,65 + 40 * 10^{-3} * 6 * 90,43}{(35,7 + 40) * 10^{-3}} = 462,32kN$$

$$N_{3,Rd} = \min(F_{t,Rd,ch}; B_{p,Rd,ch}) s = 90,43 * 6 = 542,59kN$$

$$N_{Rd} = \min(N_{1,Rd}; N_{2,Rd}; N_{3,Rd}) = \min(689,67; 435,11; 542,59) = 462,32kN$$

$$N_{Rd} = 462,32kN \geq N_{ed} = 360,89kN \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

## **8.2 Mezní stav použitelnosti**

Co se týká maximální horizontální výchylky stožáru, v tomto ohledu posuzujeme velikost posunutí uzlů s limitní hodnotou danou normou [3]. U telekomunikačních stožárů by se mělo ještě posoudit, zda nebude deformacemi konstrukce narušena správná funkce antén.

U plošných antén, které vysílají v širokém úhlovém rozmezí, nebudou požadována tak malá limitní natočení antény jako u směrových antén na velkou vzdálenost. Tyto parametry dodává výrobce antén. Limitní hodnoty se pohybují do 3°. Teoreticky si je můžeme zvolit, avšak jejich hodnota by měla dosahovat maximálně několika málo jednotek úhlových stupňů v horizontálním i vertikálním směru.

Pootočení vypočtená z posunutí uzlů byla zaznamenána do tabulky 8.2. Je však důležité říct, že normály k anténám jsou rovnoběžné s osou y v globálním souřadném systému, který tabulka používá.

*tabulka 8.2 – přehled potočení normál k plochám antén kolem os GSS*

| anténa | $z_{T,i}$ [m] | vítr -30°       |                 |                 | vítr +30°       |                 |                 |
|--------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|        |               | $\varphi_x$ [°] | $\varphi_y$ [°] | $\varphi_z$ [°] | $\varphi_x$ [°] | $\varphi_y$ [°] | $\varphi_z$ [°] |
| 3      | 28,5          | 0,55            | 0,52            | 0,26            | 0,55            | 0,31            | 0,26            |
| 2      | 26,5          | 0,56            | 0,32            | 0,22            | 0,56            | 0,32            | 0,22            |
| 1      | 24,5          | 0,55            | 0,33            | 0,20            | 0,56            | 0,32            | 0,20            |

Posuzujeme také velikost deformací pro pocit bezpečí osob v okolí konstrukce stožáru. Tento posudek spočívá v porovnání poměru maximální horizontální výchylky a výšky stožáru s poměrnou hodnotou výšky stožáru v normě. V následující části textu kapitoly je uvedeno posouzení konstrukce stožáru na mezní stav použitelnosti s ohledem na velikost deformací.

$$u_{x,max} = 99,4mm$$

$$u_{y,max} = 170,2mm$$

$$u_{max} = \sqrt{u_{x,max}^2 + u_{y,max}^2} = \sqrt{99,4^2 + 170,2^2} = 197,1mm$$

$$u_{lim} = \frac{h}{100} = \frac{290000}{100} = 290mm \geq u_{max} = 197,1mm \Rightarrow \textbf{VYHOVUJE}$$

### **8.3 Mezní stav únavy**

Na konstrukci aplikujeme zatížení pro rozkmit napětí při kmitání ve směru větru a při odtrhávání vírů. Z vnitřních sil dopočteme rozkmit napětí ve všech částech každého na únosnost posouzených styčníků. Při posouzení na únavu je důležité správně určit kategorie únavových detailů v kapitole 8 v ČSN EN 1993-1-9 [8]. Důležité je také stanovení návrhové životnosti. Po konzultaci s vedoucím diplomové práce byla dohodnuta délka životnosti 50 let.

### **8.3.1 Kategorie únavových detailů**

Pro K styčníky i T styčníky spadá nárožník v místě konce styčnickového plechu podle tabulky 8.4, detailu 2 do kategorie  $\Delta\sigma_c = 71MPa$ . Rozkmity větší než prahový rozkmit vznikaly pouze na styčnicích na 1. montážním dílci.

Svarový přípoj trubky nárožníku a styčnickového plechu dvěma koutovými svary po jeho délce spadá podle tabulky 8.5, detailu 3 do kategorie  $\Delta\sigma_c = 36MPa$  pro namáhání kolmo k nárožníku a  $\Delta\tau_c = 80MPa$  pro namáhání ve směru nárožníku.

U K styčnicků je namáhání kombinované a složka namáhání svaru kolmá k nárožníku je výrazně menší než složka ve směru nárožníku a styčnickové plechy jsou dostatečně velké, byla uvažována ve svarech pouze kategorie  $\Delta\tau_c = 80MPa$  pro rozkmit  $\tau_{\parallel}$  ve svarech. Ani u jednoho K styčnicku nebylo dosaženo prahového rozkmitu napětí, takže tato část styčnicku kmitání nebude dlouhodobě poškozována únavovým zatížením.

U T styčnicků je významná pouze složka kolmá k nárožníku. Svary se tedy řadí do kategorie  $\Delta\sigma_c = 36MPa$ . Pro svary bylo vypočteno celkové napětí  $\sigma$  ve svaru (41). Tento postup není úplně shodný s výpočtem rozkmitu napětí podle normy [8], ale protože je na bezpečné straně, nehrozí použitím jiného postupu výpočtu rozkmitu napětí nebezpečí poddimenzování této části styčnicku na únavu.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3\tau_{\parallel}^2 + 3\tau_{\perp}^2} \quad (41)$$

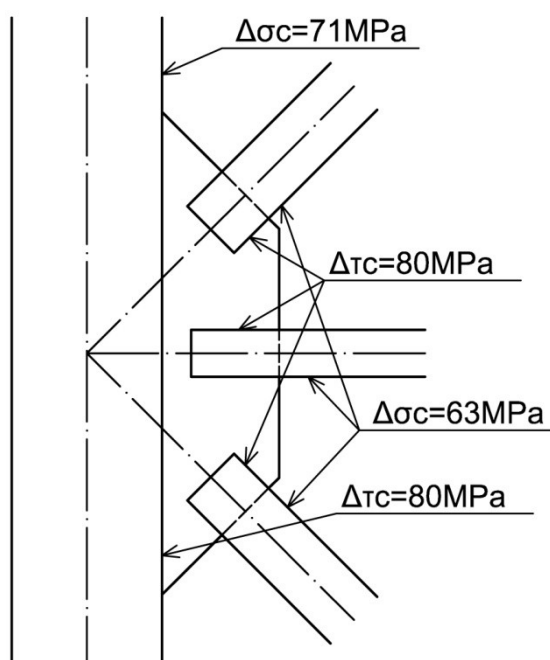
Pro napojení výplňových prutů na styčnickový plech bylo zvoleno vytvoření výřezu do trubky, který je zakončen kruhovým otvorem. Trubka výplňového prutu bude na konci kolmo seříznuta a přivařena čtyřmi koutovými svary. Takové provedení svarového přípoje spadá podle tabulky 8.6, detailu 2 do kategorie  $\Delta\sigma_c = 63MPa$  pro trubku výplňového prutu a  $\Delta\tau_c = 80MPa$  pro koutové svary, ale protože nebylo dosaženo prahového rozkmitu v koutových svarech, tato část styčnicku kmitání nebude dlouhodobě poškozována únavovým zatížením.

Pro upravenou verzi přípoje diagonál, které začínají a končí v jiném montážním dílci, se pro přípoj diagonály ke koncovému plechu použijí stejné kategorie jako v předchozím odstavci

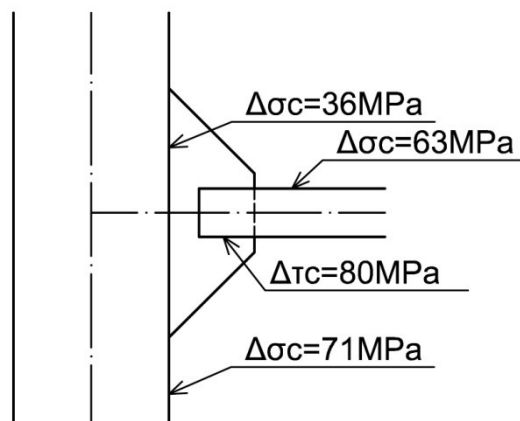
pro svarový přípoj vyplňového prutu ke styčnickému plechu. Koncový plech má otvory pro šrouby, a proto podle tabulky 8.1, detailu 12 spadá do kategorie  $\Delta\sigma_c = 80MPa$ . Šrouby namáhané ve smyku se vždy řadí podle tabulky 8.1, detailu 15 do kategorie  $\Delta\tau_c = 100MPa$ .

Co se týká montážních spojů na nárožnicích provedených pomocí příruby s otvory na šrouby, tak svarový přípoj příruby k trubce nárožníku podle tabulky 8.5, detailu 11 spadá do kategorie  $\Delta\sigma_c = 71MPa$ . Šrouby namáhané v tahu spadají podle tabulky 8.1, detailu 14 do kategorie  $\Delta\sigma_c = 50MPa$ .

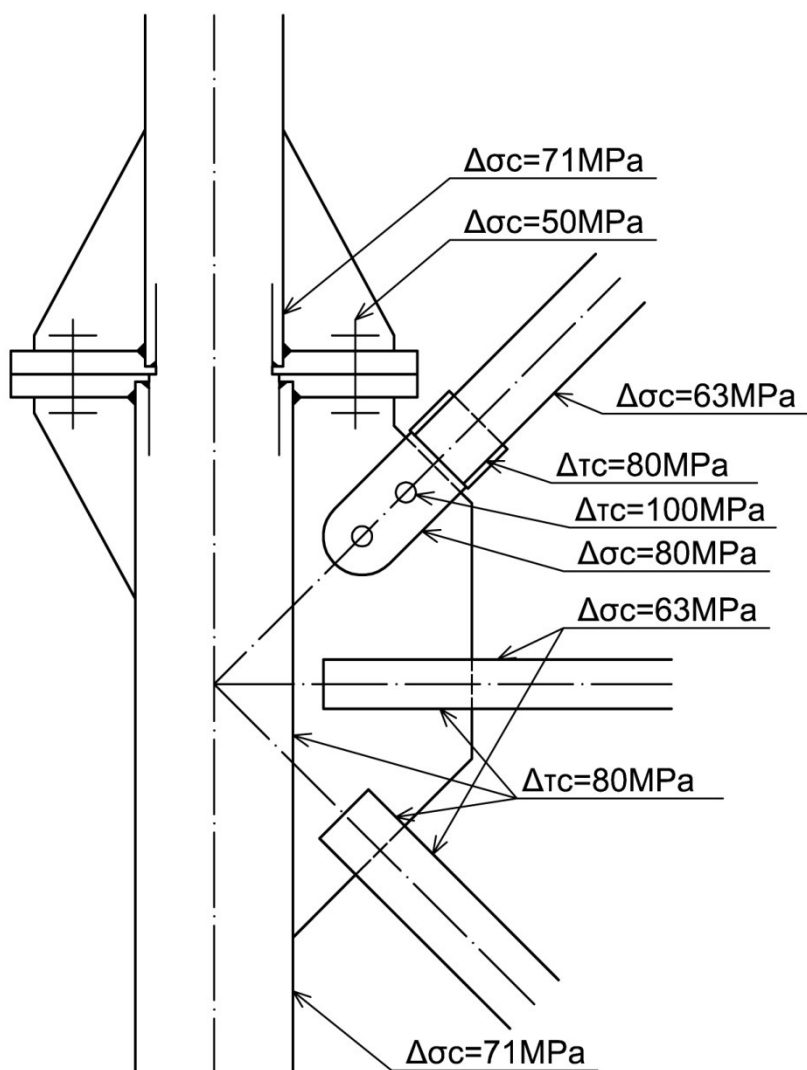
obrázek 8.5 – kategorie únavových detailů K styčnicku



obrázek 8.6 – kategorie únavových detailů T styčnicku



obrázek 8.7 – kategorie únavových detailů upraveného K styčníku



### **8.3.2 Posouzení únavových detailů**

Poté když máme vypočteny rozkmity napětí a určeny kategorie únavových detailů, ověříme, zda jsou splněny podmínky na začátku kapitoly 8 v ČSN EN 1993-1-9 [8]. Pro každý únavový detail to jsou 2 podmínky, z nichž první (42) požaduje omezení rozkmitu napětí shora hodnotou 1,5 násobku meze kluzu oceli. Pro únavové detaily posuzované podle smykových únavových křivek je rozkmit napětí omezen shora 1,5 násobkem meze kluzu oceli poděleným odmocninou ze tří. První podmínka byla u všech únavových detailů splněna.

$$\Delta\sigma \leq 1,5f_y \quad (42)$$

$$\Delta\tau \leq 1,5 f_y / \sqrt{3} \quad (43)$$

Druhá podmínka omezuje rozkmit napětí v návrhové hodnotě  $\Delta\sigma_{ed}$  a  $\Delta\tau_{ed}$  vynásobený součinitelem  $\lambda$  shora hodnotou kategorií únavového detailu. Hodnota  $m$  je dána sklonem Wöhlerovy křivky.  $N$  je počet cyklů příslušný vypočtenému rozkmitu napětí v části styčnicku.

$$\lambda = \left( \frac{N}{2 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (44)$$

$$\Delta\sigma_{2,ed} = \lambda \Delta\sigma_{ed}; \Delta\sigma_{2,ed} \leq \Delta\sigma_c \quad (45)$$

$$\Delta\tau_{2,ed} = \lambda \Delta\tau_{ed}; \Delta\tau_{2,ed} \leq \Delta\tau_c \quad (46)$$

Druhá podmínka (45) nebyla splněna pouze u šroubového spoje montážních dílců. Součinitel  $\lambda$ , který převádí rozkmit napětí  $\Delta\sigma_{ed}$  na rozkmit napětí při počtu cyklů  $2 \cdot 10^6$   $\Delta\sigma_{2,ed}$ , se při všech pokusech snížit hodnotu  $\Delta\sigma_{2,ed}$  upravil a rozkmit  $\Delta\sigma_{2,ed}$  se ustálil na hodnotě o 10 kPa přesahující kategorii únavového detailu  $\Delta\sigma_c = 50 \text{ MPa}$ . Vzhledem k součiniteli spolehlivosti pro závažné důsledky  $\gamma_{m,f} = 1,35$ , uvažujeme tento velmi malý rozdíl vzhledem k součiniteli spolehlivosti za zanedbatelný a tento únavový detail prohlašujeme za vyhovující v mezním stavu únavy.

Přehled vypočtených rozkmitů napětí a počtu cyklů, které jsou schopny únavové detaily bez porušení vydržet, je uvedeno v tabulce 8.3. Tabulka 8.4 obsahuje ověření obou podmínek, které musí být splněny, aby styčnick na únavu vyhověl. V tabulkách je uvedena pouze část styčnicků z důvodu velikosti kompletní tabulky uvedené v příloze č. 6.

tabulka 8.3 – rozkmit napětí a výpočty počtu cyklů v únavových detailech spojů mont. dílů

| styčnick/část styčnicku    |                               | $\Delta\sigma_{ed}$<br>[MPa] | kategorie<br>detailu<br>$\Delta\sigma_c$<br>[MPa] | mez<br>únavy<br>$\Delta\sigma_D$<br>[MPa] | prahový<br>rozkmít<br>$\Delta\sigma_L$<br>[MPa] | $N_{i,Rd}(\sigma)$<br>[-] | $N_{i,ed}$ [-] |
|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|---|---|---------------------------|----------------|
| kotvení<br>do zákl.        | svar. př. příruby k nárožníku | 31,78                        | 71  | 52,33                                     | 28,73   | 6,1E+07                   | 1,0E+05        |
|                            | šrouby namáhané tahem         | 93,26                        | 50  | 36,85                                     | 20,23   | 3,1E+05                   |                |
| spoj<br>mezi 1. a<br>2. MD | svar. př. příruby k nárožníku | 32,26                        | 71  | 52,33                                     | 28,73   | 5,6E+07                   | 1,0E+05        |
|                            | šrouby namáhané tahem         | 65,89                        | 50  | 36,85                                     | 20,23   | 8,7E+05                   |                |
| spoj<br>mezi 2. a<br>3. MD | svar. př. příruby k nárožníku | 27,33                        | 71  | 52,33                                     | 28,73   | $\infty$                  | 1,0E+05        |
|                            | šrouby namáhané tahem         | 79,41                        | 50  | 36,85                                     | 20,23   | 5,0E+05                   |                |
| spoj<br>mezi 3. a<br>4. MD | svar. př. příruby k nárožníku | 25,80                        | 71  | 52,33                                     | 28,73   | $\infty$                  | 1,0E+05        |
|                            | šrouby namáhané tahem         | 37,23                        | 50  | 36,85                                     | 20,23   | 4,8E+06                   |                |

tabulka 8.4 – ověření podmínek maximální velikosti rozkmitů napětí.

| styčník/část styčníku      |                               | $\Delta\sigma_{ed}$<br>[MPa] | kategorie<br>detailu<br>$\Delta\sigma_c$<br>[MPa] | $N_{i,Rd}(\sigma)$<br>[-] | $\Delta\sigma_{2,ed}$<br>[MPa] | $\Delta\sigma_{ed} \leq 1,5f_y$<br>[V/N] | $\Delta\sigma_{2,ed} \leq \Delta\sigma_c$<br>[V/N] |
|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|---------------------------|--------------------------------|--|--|
| kotvení<br>do zákl.        | svar. př. příruby k nárožníku | 31,78                        | 71  | 6,1E+07                   | 62,85                          | V  | V  |
|                            | šrouby namáhané tahem         | 93,26                        | 50  | 3,1E+05                   | 50,01                          | V  | N  |
| spoj<br>mezi 1. a<br>2. MD | svar. př. příruby k nárožníku | 32,26                        | 71  | 5,6E+07                   | 62,85                          | V  | V  |
|                            | šrouby namáhané tahem         | 65,89                        | 50  | 8,7E+05                   | 50,01                          | V  | N  |
| spoj<br>mezi 2. a<br>3. MD | svar. př. příruby k nárožníku | 27,33                        | 71  | $\infty$                  |                                | V  | V  |
|                            | šrouby namáhané tahem         | 79,41                        | 50  | 5,0E+05                   | 50,01                          | V  | N  |
| spoj<br>mezi 3. a<br>4. MD | svar. př. příruby k nárožníku | 25,80                        | 71  | $\infty$                  |                                | V  | V  |
|                            | šrouby namáhané tahem         | 37,23                        | 50  | 4,8E+06                   | 50,01                          | V  | N  |

## 9. Závěr

V diplomové práci byly popsány druhy telekomunikačních stožárů a pro vetknuté stožáry byly porovnány 3 varianty tvaru ztužení konstrukce. Hlavními kritérii pro volbu varianty konstrukce, která byla kompletně navrhnutá a posouzena, byly hmotnost konstrukce a velikost horizontální výchylky. Cena za výrobu konstrukce se obvykle počítá podle hmotnosti konstrukce a složitosti spojů.

Zjistili jsme, že při zmenšování horizontální výchylky se zvyšuje součinitel plnosti a tím i návětrná plocha. Čím více je prutů, tím je složitější provedení styčníků. Protože lehčí konstrukce má méně prutů a také jednodušší styčníky, byla vybrána nejlehčí varianta stožáru s nejmenšími součiniteli plnosti.

I u nejlehčí varianty stožáru byl při návrhu konstrukce důležitější mezní stav použitelnosti, protože bylo nutné přidání horizontálních ztužidel ve třetinách výšky a ve vrcholu stožáru. Využití prutů konstrukce se pohybovalo nejvýše kolem 80%.

Diagonály byly značně předimenzovány. Horizontály nenesly prakticky žádné zatížení, ale projevíly se jako užitečné při zkracování vzpěrných délek nárožníků i kotvení žebříku.

Svarové spoje se ukázaly také předimenzované, i když byla navržena minimální délka svarů jako sedmi až osminásobek účinného rozměru svaru. Šroubové spoje byly kritické z hlediska posouzení na únavu, kdy spoje montážních dílců na nárožnících ve spodní polovině stožáru jen těsně vyhověly.

Tvar horizontálního ztužení byl v modelu prostorové příhradové konstrukce zjednodušen. Zjednodušené ztužidlo má však menší tuhost, než jaké ve skutečnosti bude navržené ztužidlo mít. Stožár musí být nějak dostupný pro údržbu. Dostupnost je zajištěna žebříky s ohledem na rozměry konstrukce. Zatížení od pracovníků při údržbě však nemá smysl současně se zatížení větrem uvažovat, protože k takové kombinaci nemůže dojít z důvodu požadavku na bezpečnost i pracovní podmínky pracovníků údržby. Samonosný přístupový žebřík kotvený v několika výškových úrovních pouze v horizontálním směru, nebyl součástí návrhu.

Při vypracování práce jsme se seznámili s výpočtem zatížení konstrukce, která je dynamicky zatížena větrem. Mezi největší přínosy diplomové práce bezpochyby zjištění několika závislostí velikosti zatížení na vlastnostech konstrukce, například že zesílení konstrukce hustším ztužením neznamena mít větší rezervu při posouzení. V mezních stavech konstrukce vyhověla s dostatečnou rezervou. Nejslabším článkem na únavové porušení jsou tahem namáhané šrouby spojující montážní dílce na nárožnících.



**seznam příloh**

|              |  |
|--------------|--|
| příloha č. 1 | Výpočet zatížení větrem                                  |
| příloha č. 2 | Vnitřní síly v prutech konstrukce                        |
| příloha č. 3 | Posouzení prutů na mezní stav únosnosti                  |
| příloha č. 4 | Posouzení styčníků na mezní stav únosnosti               |
| příloha č. 5 | Posunutí a pootočení antén v mezním stavu použitelnosti  |
| příloha č. 6 | Posouzení styčníků na únavu při kmitání ve směru větru   |
| příloha č. 7 | Posouzení styčníků na únavu při kmitání odtrháváním vírů |
| příloha č. 8 | Telekomunikační antény                                   |
| Výkresy      |  |

**Seznam použité literatury**

- [1] ČSN 01 3483: *Výkresy kovových konstrukcí*, Praha: Český normalizační institut; 1987
- [2] ČSN 73 1403: *Navrhování trubek v ocelových konstrukcích*, Praha: Český normalizační institut; 1999
- [3] ČSN EN 1990: *Zásady navrhování konstrukcí*, Praha: Český normalizační institut; 1990
- [4] ČSN EN 1991-1-4: *Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*, Praha: Český normalizační institut; 2007
- [5] ČSN EN 1993-1-1: *Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, Praha: Český normalizační institut; 1993
- [6] ČSN EN 1993-3-1: *Navrhování ocelových konstrukcí – Část 3-1: Stožáry a komíny – Stožáry*, Praha: Český normalizační institut; 2008
- [7] ČSN EN 1993-1-8: *Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-8: Navrhování styčníků*, Praha: Český normalizační institut; 2006
- [8] ČSN EN 1993-1-9: *Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-9: Únava*, Praha: Český normalizační institut; 2006
- [9] ČSN EN ISO 14122-4, *Bezpečnost strojních zařízení – Trvalé prostředky přístupu ke strojním zařízením – Část 4: Pevné žebříky*, Praha: Český normalizační institut; 2005
- [10] Studnička J., Macháček J., Votlučka L., *Ocelové konstrukce 20 Pozemní stavby*, Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998